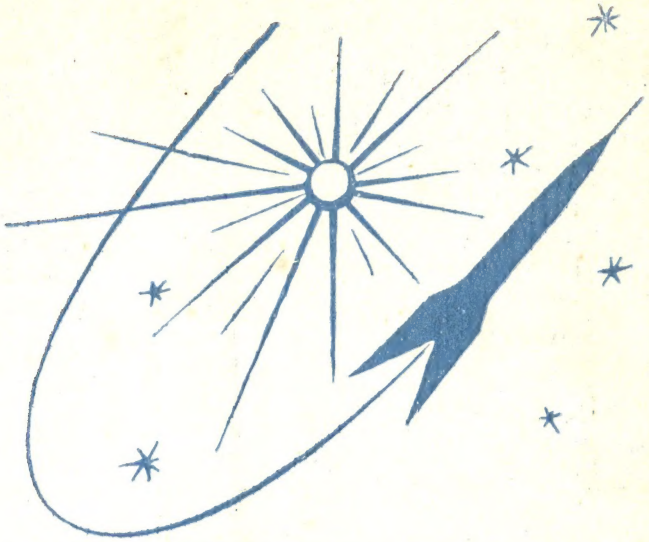
Детская энциклопедия

К[redacted] С[redacted]

24 апреля 1967 года



В науке нет широкой столбовой дороги, и только тот может достигнуть ее сияющих вершин, кто, не страшась усталости, карабкается по ее каменистым тропам.

Карл Маркс

Ведущее место в естествознании занимают физические науки, от успешного развития которых зависит движение вперед смежных наук и народного хозяйства. Дальнейшие перспективы технического прогресса определяются в настоящее время прежде всего достижениями основных направлений физической науки. Усилия советских физиков будут сконцентрированы на разработке проблем космических лучей, ядерных реакций, полупроводников.

Большое теоретическое и практическое значение для развития многих отраслей науки и практики имеют работы по математике. В частности, успехи вычислительной математики имеют непосредственную связь с развитием автоматики.

В области химических наук важнейшей задачей является всемерное расширение теоретических исследований, способствующих разработке новых усовершенствованных технологических процессов и созданию синтетических материалов со свойствами, удовлетворяющими запросы современной техники.

(Из Контрольных цифр развития народного хозяйства СССР на 1959—1965 годы, утвержденных XXI съездом КПСС)

АКАДЕМИЯ ПЕДАГОГИЧЕСКИХ НАУК РСФСР

★

Москва

1961

Детская Энциклопедия

ДЛЯ СРЕДНЕГО И СТАРШЕГО ВОЗРАСТА

ТОМ 3

ЧИСЛА И ФИГУРЫ ВЕЩЕСТВО И ЭНЕРГИЯ

Издательство Академии Педагогических Наук РСФСР

ГЛАВНАЯ РЕДАКЦИЯ

Д. Д. БЛАГОЙ, В. А. ВАРСАНОФЬЕВА, Б. А. ВОРОНЦОВ-ВЕЛЬЯМИНОВ, П. А. ГЕНКЕЛЬ, Н. К. ГОНЧАРОВ, А. В. ЕФИМОВ, И. А. КАИРОВ, А. Г. КАЛАШНИКОВ, Л. А. КАССИЛЬ, А. Н. ЛЕОНТЬЕВ, А. Р. ЛУРИЯ, А. А. МАРКОСЯН, А. И. МАРКУШЕВИЧ (главный редактор), С. Я. МАРШАК, В. Ф. НАТАЛИ, М. В. НЕЧКИНА, С. В. ОБРАЗЦОВ, Б. П. ОРЛОВ, О. Н. ПИСАРЖЕВСКИЙ, С. Д. СКАЗКИН, Ф. Д. СКАЗКИН, А. А. СМИРНОВ, В. И. СОБОЛЕВСКИЙ, А. И. СОЛОВЬЕВ, Л. И. ТИМОФЕЕВ, Т. С ХАЧАТУРОВ, Ю. В. ХОДАКОВ, К. И. ЧУКОВСКИЙ, В. Н. ШАЦКАЯ, Д. А. ЭПШТЕЙН

* * *

НАУЧНЫЕ РЕДАКТОРЫ 3-го ТОМА

А. И. Маркушевич, А. Г. Калашников, Ю. В. Ходаков

Заместитель главного редактора ***П. А. Мурин***

Заведующий производственным отделом — заместитель директора издательства ***Л. Р. Свирский***
Заведующий редакцией ***Б. Л. Бараш.*** *Ученый секретарь главной редакции* ***И. М. Аксельрод***

Содержание

ЧИСЛА И ФИГУРЫ

(Математика)

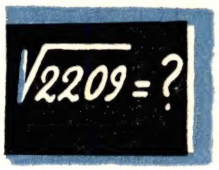
Несколько слов о математике. А. И. Маркушевич 21

ЧИСЛА

Как люди считали в старину и как писали цифры. И. Г. Башмакова 25
Счет двойками, тройками и дюжинами 26
Задача на взвешивание 27
Наш устный счет 29
Счет у первобытных народов 31
Первые нумерации 33
Алфавитные нумерации. Псаммит 34
Позиционные системы 37

Простейшие неопределенные уравнения. В. И. Нечаев 40
Пифагоровы треугольники 40
Покупка билета в метро 41
Взвешивание груза на чашечных весах 41
Неопределенные уравнения 42
Рациональные и целые решения неопределенных уравнений первой степени. Метод рассеивания 42
Решение задачи о взвешивании 43
Решение задачи о покупке билета в метро 44
Неопределенные системы уравнений первой степени 45
Рациональные решения неопределенных уравнений степени выше первой 46
Целые решения неопределенных уравнений степени выше первой . . 47

КУЛЬТУРА СЧЕТА И ПРИБЛИЖЕННЫЕ ВЫЧИСЛЕНИЯ



Хорошо ли вы считаете. П. Ю. Германович 49
- Когда не следует пользоваться шаблонными приемами вычислений 50
- Умеете ли вы размышлять 51
- Сложение «в уме» нескольких двузначных чисел 53
- Умножение «в уме» двузначных чисел 53
- Умножение двух двузначных чисел, близких к 100 53
- Процентные вычисления 54
- Особые случаи возведения чисел в квадрат 54
- Заключение 55

Счетные приспособления. А. П. Доморяд 55
- Счеты и палочки Непера 57
- Логарифмическая линейка 59
- Умножение и деление 60
- Возведение в степень и извлечение корня 61
- Счетные машины 62

Электронные счетные машины. М. Г. Рейнберг 66
- Машины-модели 67
- Цифровые машины 68
- Мир электрических импульсов 71
- О двоичной арифметике 72
- «Анатомия» цифровой машины 75
- Замечательные свойства цифровой машины 78
- Цифровая машина работает 78
- Заключение 82

ФИГУРЫ И ТЕЛА

Геометрия вокруг нас. М. В. Потоцкий 83

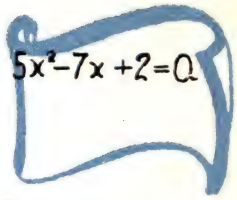
Как возникла геометрия. И. Г. Башмакова 89
- Возникновение геометрии как науки 90
- Построение дедуктивной системы 92

Измерение длин, площадей и объемов. Н. И. Польский 93
- Измерение длин 93
- Измерение площадей 95
- Измерение объемов 99

Геометрические отображения. И. М. Яглом 100
- Движения и отображения подобия 101
- Некоторые более сложные отображения 104
- Отображения как основа классификации теорем 106

О различных геометриях. Н. И. Польский 107
- С чего начинается изложение геометрии 107
- Что такое аксиомы 109
- Аксиома о параллельных 110
- Попытки доказать аксиому о параллельных 111
- Равна ли сумма углов треугольника 180° 111
- Геометрия Лобачевского 114
- Геометрия кривых поверхностей 114
- Какова же геометрия нашего мира 116
- Заключение 118

УРАВНЕНИЯ И ФУНКЦИИ

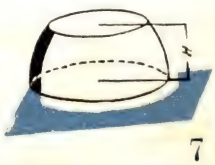


Как люди учились решать уравнения. И. Я. Депман 119
Метод двух ложных положений 120
Введение понятия неизвестного числа 121
Квадратные уравнения 122
Уравнения степени выше второй 123
Когда появились термины, употребляемые в учении об уравнениях . 124

Что такое координаты и для чего они служат. М. В. Потоцкий. . . . 124
Система координат 126
Построение графиков 130
Уравнения линий 130
Решение трудных геометрических задач с помощью системы координат 133
Улитка Паскаля 138
Трисекция угла с помощью улитки Паскаля 139

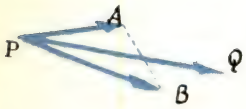
Функции в природе и технике. Н. Я. Виленкин 141
Число *e*. Натуральные логарифмы 141
Один человек может удержать корабль 142
Канат равного сопротивления разрыву 142
Радиоактивный распад вещества 143
Включение и выключение постоянного тока 143
Остывание чайника 143
Почему парашютист падает равномерно 144
Как измеряют высоту при помощи барометра 144
Сколько топлива должна взять ракета 145
Гармонические колебания 145
Колебания маятника 146
Разряд конденсатора 146
Напряжение переменного тока 146
Как соединить две трубы 146
Как изгибается колонна 147
Затухающие колебания 147
Вынужденные колебания 148
Сложение колебаний 148
Биения 149
Приливы и отливы 150
Модулирование колебаний 150
Разложение периодически меняющейся силы на гармонические составляющие 150
Спектральный анализ 151
Как машина открыла теорему 151
Почему не работал трансатлантический кабель 152
Радиоприемник и камертон 152
Заключение 152

Интеграл и производная. В. Г. Болтянский и Н. Я. Виленкин 153
Задача Кеплера 153
Математика за чайным столом 153
Объем тела 153
Промер реки 154
В автомобиле 155
Работа паровоза 155
Интеграл 156



Геометрическое вычисление интегралов 156
Интегрирование многочленов 158
Применения интегралов 159
Чудесная формула 160
Как измерить скорость полета пули 161
Скорость радиоактивного распада 162
Умеете ли вы проводить касательную 162
Производная 163
Производные многочленов 164
Пчелы-математики 164
Как сделать самую большую коробку 165
Балка наибольшей прочности 166
Формула Ньютона—Лейбница 167
Производные синуса и косинуса 167
Производная показательной функции 168
Радиоактивный распад 169
Показательная функция в природе и технике 170
Леверье и Адамс открывают новую планету 170
Уравнение гармонических колебаний 171
Моделирование 172

АЛГЕБРА КОНЕЧНОГО И БЕСКОНЕЧНОГО

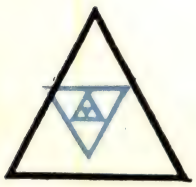


Геометрическая алгебра. А. М. Лопшиц 173
Геометрия помогает физике 173
Геометрия создает новую алгебру 177
Векторная алгебра на службе у геометрии 180

Числа и действия. В. Г. Болтянский 185
Много ли нужно чисел для решения уравнений 185
Нужны новые числа 186
Увеличить вдвое объем куба 187
Алгебраические и неалгебраические (трансцендентные) числа . . . 189
Полное изобилие чисел 189
Вместо четырех действий — три 190
Над чем можно производить действия 191
Понятие группы 192
Примеры групп 193
Группы подстановок 194

Необыкновенная арифметика. В. Г. Болтянский и Б. А. Кордемский 196
Арифметика остатков 196
Можно ли перерешать все квадратные уравнения 198
Арифметика вычетов помогает обычной арифметике 199
Признаки делимости 199
Теорема Ферма 200
Один секрет быстрого счета 201

Понятие множества. П. С. Александров 202
Множества конечные и бесконечные 202
Взаимно-однозначное соответствие между двумя множествами . . . 204
Счетные множества 205
Множество всех рациональных чисел счетно 206
Множество всех действительных чисел несчетно 207
Мощность множества 208



ПЕРВОЕ ЗНАКОМСТВО С ТЕОРИЕЙ ВЕРОЯТНОСТЕЙ

Наука о случайном. А. Я. Хинчин и А. М. Яглом 211
Существуют ли закономерности случайных явлений 212
Что называется вероятностью события 214
При решении каких задач возникла теория вероятностей 214
Какие задачи решали методами теории вероятностей во время войны 216
Несколько слов об истории развития теории вероятностей 217
Какие задачи решают методами теории вероятностей в наше время 218
Теория вероятностей и теория информации 219

СПРАВОЧНЫЙ ОТДЕЛ

Что читать по математике. Ю. И. Соркин 221
Указатель имен и предметов. Ю. И. Соркин 225
Условные обозначения и сокращения 232

ВЕЩЕСТВО И ЭНЕРГИЯ

(Физика)

Место физики среди других наук о природе. А. И. Китайгородский 235

МЕХАНИЧЕСКИЕ ЯВЛЕНИЯ

Основы механики. Г. И. Покровский 241
Механическое движение, или перемещение 242
Движение может переходить из одних видов в другие 242
Скорость 243
Скорость — производная пути по времени 244
Примеры движений, имеющих различные скорости 244
Скорость — вектор 245
Сложение скоростей 245
Ускорение 246
Закон инерции 247
Сила — мера взаимодействия 247
Ускорение — мера силы и массы тела 248
Единицы силы и единицы массы 248
Всемирное тяготение 248
Пример расчета силы 249
Действие сил на многоступенчатую ракету 250
Сложение сил 251
Действие равно противодействию 252
Импульс силы и количество движения 252
Работа и энергия 253
Мощность 254
Закон сохранения энергии 255
Закон сохранения материи 256
Скорость света — это предельная скорость любого движения . . . 257

Звук и ультразвук. А. А. Коробко-Стефанов 259
Звук 259
Упругость воздуха 259
Энергия звуковой волны и сила звука 261
Тон, высота, тембр и громкость звука 263

Восприятие звука органом слуха 264
Как объяснить нашу способность определять, откуда приходит звук 264
Музыкальные тоны и шумы 264
Запись звуков 266
Передача звука на расстояние 269
Неслышимые «звуки» 271
Излучатели ультразвука 272
Ультразвук в технике и на производстве 274

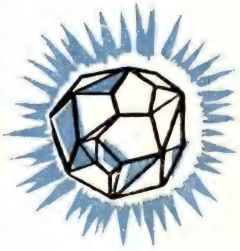
ПЛАВАНИЕ И ЛЕТАНИЕ

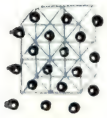
Плавание тел. С. З. Ушаков 277
Тайна острова Пасхи. Люди на плоту. Только догадки 277
Как жидкости встречают «гостей» 279
Попробуем танцевать не от печки. Воспоминания, которые не у всех есть. Рисунки-помощники 279
С помощью знаменитого голландца побеждаем высшую математику. Умный лодочник 281
Пешеходные дорожки и легендарные рассказы. Архимед и его открытие 282
Средний удельный вес. Подводная лодка. Автономный водолаз . . . 284
«Потолок» и дно океана. «Подводные легкие» и стальные скорлупы . . . 285
Упрямое полено. Центр давления 287
От полена — к кораблю. Центр давления путешествует 288
Всегда ли существует выталкивающая сила? Соприкосновение с дном 288
Следи за строгостью доказательств. И надежный друг может подвести. Метацентр 288
Забавная виноградина и подъем затонувших судов. Дороги через реки 289
Водоизмещение и соленость морей 290
Катастрофа в Саутгемптоне. Академик Крылов. Коротко о нашем флоте 290
Ловушка для ветра 291
Гидростатика — это только одна улица «большого города» физики . 292

Летательные машины. С. М. Ильяшенко 293
Физика полета 293
Самолеты 301
Авиационные двигатели 308
Приборное оборудование самолета 312
Планеры 315
Вертикально-взлетающие машины 315
Будущее авиации 317
Советские ракеты и искусственные спутники Земли. И. А. Минасян . . 318
Межконтинентальная баллистическая ракета 320
Исследовательские ракеты 322
Советские спутники Земли 324
Что дали науке первые искусственные спутники 324
Законы движения спутников 326
Конструкция и оснащение первых советских спутников 329
Телеметрия 332
Траектория запуска и орбиты советских спутников 333
Третий советский спутник Земли 336
Советская космическая ракета 341
Конструкция искусственного спутника Солнца 344

Какими приборами была оснащена космическая ракета 346
Изучение межпланетного газа 346
Космические лучи 346
Магнитные измерения 347
Метеориты 347
Как наблюдали за полетом ракеты и поддерживали с ней радиосвязь 348
Земля — Луна 349
Проблемы будущего 350

СТРОЕНИЕ ВЕЩЕСТВА И РАБОТА ТЕПЛОВЫХ МАШИН





Молекулярное строение вещества. А. И. Китайгородский . . . 355
Атомы и молекулы 357
Движение молекул 359
Как построены молекулы 360
Как измеряют молекулы 362
Взаимодействие молекул 363
Три состояния вещества 364
Кристаллы 365
Строение кристаллов 366
Порядок и беспорядок в мире атомов 368
Молекулы-гиганты 370
Почему стекло хрупкое, а глина мягкая 371

Путешествие в мир температур и давлений. К. А. Гладков 373
Глубокий вакуум 373
Выше атмосферного 375
Огонь 376
Теплота и жизнь 378
На подступах к абсолютному нулю 380
Как удержать теплоту 383
Химия высоких температур 386
Очень высокие температуры 388
Сверхвысокие температуры 389

Физические принципы работы тепловых машин. И. Я. Конфедератов 391

ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ ЯВЛЕНИЯ

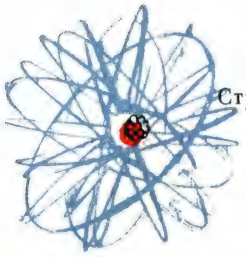
Электричество и магнетизм. Ю. Л. Климантович и Г. Я. Мякишев 405
Рождение науки 407
Электрическое поле 407
Вещества в электрическом поле 411
Электрический ток в металлах 414
Прохождение электрического тока через газы 416
Электрический ток в жидкостях 419
Магнитное поле 420
Магнитные свойства вещества 422
Электромагнитная индукция 424
Как получают электрический ток 427
Переменный электрический ток 428
Преобразователь электрического тока 429
Теория Максвелла 430

Свет и его применение. А. А. Коробко-Стефанов 431
Прямолинейное распространение света 431
Закон отражения света 432
Преломление света 434
Ньютон и Гюйгенс о природе света 435
Первое измерение скорости света 437
Явление полного отражения 439
Голубая оптика 440
Восприятие света глазом 440
Зрительные трубы 441
«Ночезрительная» труба Ломоносова 443
Зеркальный телескоп-рефлектор Исаака Ньютона 443
Микроскоп 444
Дисперсия света 444
Интерференция света 446
Дифракция света 447
Двойное лучепреломление света 449
Новая теория света 451
Шкала электромагнитных волн 452
Окраска тел в природе 454
Источники света 455
Фотоэффект 455
Химия света 456
Флуоресценция и фосфоресценция 456
Заключение 457

Физические основы радио. И. А. Минасян 457
Радиолампа и электроны 457
Что дал диод радио 459
Электромагнитные колебания можно усилить 460
Новые лампы — новые возможности 462
Почему на волну можно настроиться 464
Приемник и передатчик 466
Как распространяются радиоволны 467
Ионосфера 469
Рождение ионов 470
Строение ионосферы 470
Полярные сияния 471
Ионосфера и распространение радиоволн 473
Современные радиолампы 475
Электронный луч 478
Супергетеродинный прием 480
Радиотелеграф и радиорелейные линии 483
Новые виды радиосвязи 484
Радиоэлектроника 486

Полупроводники. Г. Б. Анфилов 490
Проводники и изоляторы 490
Электроны в полупроводнике 491
«Дырки» 492
Два типа полупроводников 492
Термисторы 494
Машины чувствуют свет 495
Нагреватели и светильники 495
Запирающий слой 496
Выпрямители 496

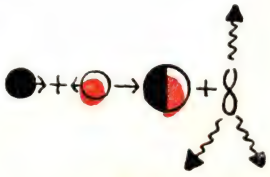
Кристаллы и лампы 497
Полупроводниковый триод 498
Надежность, миниатюрность 498
Будущее радиотехники 499
Электроэнергия из тепла 499
Применения термоэлектрогенераторов 500
Новые холодильники 501
Нагрев вместе с охлаждением 501
Вентильный фотоэлемент 502
Свет работает 503
К солнечной энергетике 503
Полупроводники и жизнь 504



ЯДЕРНАЯ ЭНЕРГИЯ

Строение атома и атомная энергия. Б. И. Смагин 505
Самые маленькие 506
Закон Менделеева 507
Случайное открытие 507
В работу включаются супруги Кюри 508
Новые элементы 509
Лучи в магнитном поле 511
Как опознали частицы 511
Законы распада 513
Три вида лучей 514
Распадающиеся семейства 514
Внутрь атома 516
Объяснение Нильса Бора 517
Преобразование элементов 518
Удар по ядрам атомов 520
Необыкновенные частицы 521
Строение ядра 522
Ядерные силы 523
Радиоактивность вызвана человеком 524
Как снять шапку-невидимку 525
Столовый прибор 525
Туман помогает видеть 526
Разнообразные методы 529
Кладовые природы 530
Слишком много новых элементов 532
Великое открытие 533
Первый путь к освобождению внутриядерной энергии 534
Как снежный ком 535
Еще один котел 537

Термоядерные реакции в природе и технике. Г. Б. Анфилов 539
Ядерный синтез 539
В недрах Солнца 540
Водородная бомба 542
Судьбы энергетики 544
Суть проблемы 544
Прямые трубки 545
Без электродов 546
Камеры-баранки 547



Магнитная ловушка 548
«Огра» 549
Содружество ученых 549
К термоядерным электростанциям 550
Вода — топливо будущего 551

СПРАВОЧНЫЙ ОТДЕЛ

Что читать по физике. Б. В. Ляпунов 553
Указатель имен и предметов. Н. П. Суворов и А. А. Коробко-Стефанов 556

ВЕЩЕСТВО И ЭНЕРГИЯ

(*Химия*)

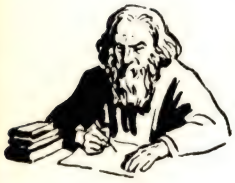
Химия и ее роль в жизни людей. Н. М. Эмануэль 565

ИСТОРИЯ ХИМИИ

Как возникла химия. С. С. Щербаков 569
Как химия превратилась в алхимию 570
Алхимия превращается в ятрохимию 574
Химия становится наукой 575
Летопись химии 578
Истоки химических знаний 578
Зарождение научной химии 579
Утверждение в химии атомно-молекулярного учения 579

АТОМЫ — КИРПИЧИ МИРОЗДАНИЯ

Периодический закон Д. И. Менделеева. П. В. Петрянов 581
Открытие великого закона 581
Как был открыт периодический закон 582
Тайна пустого места 584
Великое предсказание 585
Как оправдались предсказания Менделеева 587
Великое испытание периодического закона 588
Как радиоактивные элементы нашли свои места в таблице Менделеева 590
Что является основой великого закона 593
Периодический закон — закон строения атома 595
Почему в одном столбце стоят рядом железо, кобальт, никель . . . 597
Почему и как соединяются между собой атомы 597
Периодическая таблица наших дней 598
Как были созданы трансурановые элементы 599
Заглянем в будущее 604
Периодический закон и химия Вселенной 606
Химия Земли 607
Химия метеоритов 607
Химия планет 609
Химия Солнца 609
Межзвездное пространство 612
Химия звезд 613



Как опознаются химические элементы. С. Д. Бесков и И. Н. Селезнева . . . 615
Химический анализ — важный раздел химии . . . 615
Как возникла агрохимия . . . 616
Химический анализ на химических производствах . . . 618
Анализ «на пламя» . . . 619
Спектральный анализ . . . 619
Анализ «на перл» . . . 621
Химический анализ «мокрым путем» . . . 622

Металлы. Ю. В. Ходаков . . . 625
Сколько металлов обслуживает нас . . . 625
Как применения металлов связаны с их свойствами . . . 626
Сплавы . . . 627
Чем чугуны отличаются от сталей . . . 628
Какие бывают чугуны . . . 629
Как закаляется и отпускается сталь . . . 630
Легированные стали . . . 631
В технику приходят новые металлы . . . 632

ХИМИЧЕСКАЯ РЕАКЦИЯ

Химическое взаимодействие и катализ. С. А. Балезин и В. И. Веденеев . . . 633
Виды катализа . . . 634
Немного истории . . . 635
Особенности действия катализаторов . . . 636
Активаторы катализаторов . . . 636
Какова роль катализаторов в химической реакции . . . 637
Как же действует катализатор . . . 638
Одно из величайших изобретений человеческого разума . . . 638
Живое или неживое . . . 640
Беспламенное горение . . . 641
Что выражают химические уравнения . . . 641

ХИМИЯ СОРЕВНУЕТСЯ С ПРИРОДОЙ

Органические вещества вокруг нас. Ю. В. Ходаков . . . 647
Как распознают органические вещества . . . 648
Из чего состоят органические вещества . . . 648
Природные «фабрики» органических веществ . . . 649
Великое соревнование ученых с природой . . . 649
Современный химик и его лаборатория . . . 649
Как устанавливают состав молекул . . . 651
Химическое домино . . . 652
Мир, отраженный в зеркале . . . 655
Химик в роли строителя . . . 657

Полимеры. К. А. Гладков . . . 659
Молекулы-гиганты . . . 660
Родословная больших молекул . . . 660
Первые искусственные пластмассы . . . 661

Секрет прочности 662
Как получаются молекулы-гиганты 663
«Швейная фабрика» для гигантских молекул 664
Поликонденсация 664
Полимеризация 665
Как получают фторопласт 666
Стекло, кожа или резина 667
И в огне не горит... 670
Будущее полимеров 672

Из чего делают одежду. Л. А. Цветков 672

Из чего состоит наша пища. Л. А. Цветков 675
Искусственное получение пищевых продуктов. О. А. Реутов . . 681
Химические источники силы. Ю. В. Ходаков 682

Как были созданы искусственные краски и ароматические вещества. О. А. Реутов 685
Синтетические душистые вещества 690

Химия жизни и здоровья. Ю. В. Ходаков 691
Особенности действия веществ на живой организм 691
Молекулы против микробов 692
От красок к лекарствам 693
Усыпляющие лекарства 694
Жизненные катализаторы 695
На пути к искусственному созданию жизни 696

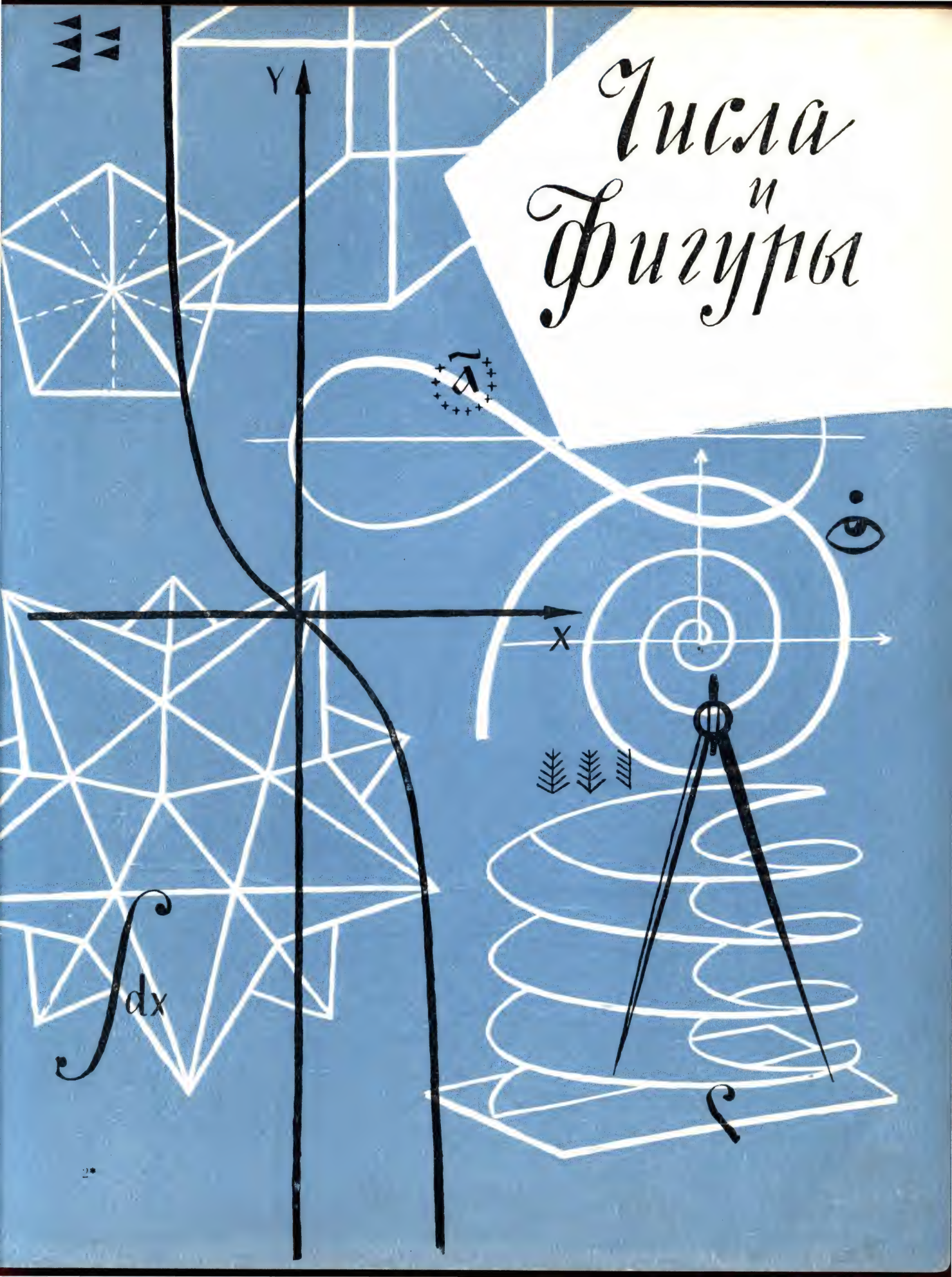
СПРАВОЧНЫЙ ОТДЕЛ

Что читать по химии. С. Д. Давыдов 700
Указатель имен и предметов. Р. Н. Савельева 703
Условные обозначения и сокращения 711

Иллюстрации и таблицы на отдельных листах

Схемы математического и физического моделирования *(художник В. Н. Добровольский)* . . . 72—73
Схема последовательности работы электронной счетной машины *(художник В. Н. Добровольский)* »
Обрабатывая результаты наблюдений за движением спутника, электронные счетные машины вычисляют его будущую орбиту *(художник К. К. Соколов)* . . . . . »
Симметрия как пример геометрического отображения *(художник А. А. Катковский)* . . . . . 104—105
План и карта как пример отображения *(художник А. В. Петров)* . . . . . »
Меры времени и длины *(художник К. К. Арцеулов)* . . . . . 256—257
Использование рычагов и блоков в сложных механизмах *(художник К. К. Арцеулов)* . . . . . »
Люди с аквалангами нашли судно, затонувшее 2000 лет назад *(художник К. К. Соколов)* . . 288—289
Внешний вид и разрез подводной лодки *(художник С. Г. Наумов)* . . . . . »
Аэродинамическая труба *(художник Л. С. Вендров)* . . . . . 304—305
Различные виды авиационных двигателей *(художник Л. С. Вендров)* . . . . . »
Гиперзвуковой самолет ближайшего будущего *(художник Г. В. Храпак)* . . . . . »
Старт многоступенчатой ракеты *(художник Н. И. Гришин)* . . . . . 320—321
Возможный внешний вид обитаемого спутника *(художник Н. И. Гришин)* . . . . . »
Первые космические путешественники на Луне *(художник Н. И. Гришин)* . . . . . 336—337
Фотонная ракета *(художник Н. И. Гришин)* . . . . . »
Некоторые кристаллические структуры *(художник С. И. Каплан)* . . . . . 368—369
Структуры тел, не имеющих кристаллического строения *(художник С. И. Каплан)* . . . . . »
Вещество в условиях различных температур *(художник В. Н. Добровольский)* . . . . . 384—385
Вещество на шкале температур и давлений *(художник В. Н. Добровольский)* . . . . . »
Виды электрических разрядов *(художник А. Н. Лебедев)* . . . . . 408—409
Различные виды электрических машин и приборов *(художник А. Н. Лебедев)* . . . . . »
Дисперсия света *(художник Г. В. Храпак)* . . . . . 448—449
Различные виды интерференции *(художник Б. А. Малышев)* . . . . . »
Давление света на хвост кометы. Опыт Лебедева *(художник К. К. Арцеулов)* . . . . . 456—457
Дисперсионные спектры. Стилоскоп *(художник Б. А. Малышев)* . . . . . »
Спектры электромагнитных колебаний *(художник Ю. И. Зальцман)* . . . . . 472—473
Схема строения земной атмосферы *(художник К. К. Арцеулов)* . . . . . »
Семейства радиоактивных элементов *(художник С. Н. Волков)* . . . . . 512—513
Ядерные реакции, идущие в недрах Солнца *(художник Б. П. Кыштымов)* . . . . . 544—545
Магнитные поля, укрепляющие плазменный разряд *(художник Б. П. Кыштымов)* . . . . . »
Лаборатория алхимика *(художник В. И. Таубер)* . . . . . 576—577
Ломоносов за получением окрашенных стекол *(художник К. К. Арцеулов)* . . . . . »
Периодическая система элементов Д. И. Менделеева *(художник Р. Ж. Аботин)* . . . . . 592—593
Начало периодической таблицы атомных ядер *(художник Р. Ж. Аботин)* . . . . . »
Схемы строения атомов легких элементов *(художники С. И. Барышникова и К. К. Соколов)* . 600—601
Схемы различных форм химической связи между атомами *(художники С. И. Барышникова и К. К. Соколов)* . . . . . »

Диаграммы распределения металлов в земной коре и в метеоритах *(художник М. И. Улупов)* 608—609
Цикл солнечных реакций *(художник М. И. Улупов)* . . . . . »
Металлические добавки окрашивают стекла в различные цвета *(художник А. А. Катковский)* . 624—625
Некоторые примеры анализа «на перл» *(художник А. А. Катковский)* . . . . . »
Различные виды катализа *(художник С. Г. Наумов)* . . . . . 640—641
«Замороженный радикал» *(художник С. Г. Наумов)* . . . . . »
Реакции получения синтетического каучука *(художник А. П. Бирюков)* . . . . . 660—661
Молекулы некоторых органических веществ и получающиеся из них полимеры *(художник А. П. Бирюков)* . . . . . »
Схема полимеризации термопластической и термореактивной смол *(художник А. П. Бирюков)* 662—663
Роль катализатора при создании полимерной молекулы *(художник А. П. Бирюков)* . . . . . »
Схема получения фторопласта *(художник С. И. Каплан)* . . . . . 664—665
Звенья молекул некоторых важных пластических масс и изготовленные из них предметы *(художник С. И. Каплан)* . . . . . »
Содержание белков, жиров и углеводов в пищевых продуктах *(художник И. К. Вечканов)* . . 680—681
Эволюция красителей *(художник С. К. Русаков)* . . . . . »
Действие адреналина и его структурная формула *(художник А. П. Бирюков)* . . . . . 692—693
Плазмохин и хинин с их структурными формулами *(художник А. П. Бирюков)* . . . . . »


Числа
и
Фигуры
Y
X
dx

НЕСКОЛЬКО СЛОВ О МАТЕМАТИКЕ

Если бы спросить всех школьников, какой предмет нравится им больше других, то вряд ли большинство из них назовет математику. Обычно ее скорее уважают, чем любят. У нас в стране научные знания пользуются большим почетом, но, конечно, и среди наших школьников есть такие, которые тяготятся изучением математики. По-видимому, дело объясняется здесь не только тем, что ее изучение многим нелегко дается и требует упорства и труда, но также и тем, что некоторые вопросы школьной математики иногда кажутся недостаточно интересными и даже порой скучными. Однако азбука и грамматика какого-либо языка часто также не очень интересны, а между тем только через их изучение лежит путь ко всей литературе с ее увлекательными сказками, рассказами, повестями, романами и стихами. Подобно этому, через те простейшие, азбучные положения математики, которые изучаются в школе, лежит столбовая дорога к современной математике — огромной, почти необозримой по своему богатству области человеческого знания, которая находит с каждым годом все больше и больше применений.

Иногда приходится слышать мнение, что в математике в основном все уже известно, что времена открытий в этой науке давно прошли, а теперь остается только изучать теоремы, названные именами ученых прошлых веков, и

применять их к решению разных задач. Но в действительности это далеко не так. Даже более того, именно сейчас математика переживает период чрезвычайно бурного развития, несмотря на то, что родилась она много тысячелетий назад. Новые математические открытия в наши дни делаются буквально ежедневно во всех частях света. Чтобы получить представление о количестве этих открытий, достаточно знать следующее. В Советском Союзе издается ежемесячный реферативный журнал «Математика», в котором убористым шрифтом печатаются самые краткие сообщения (рефераты) о различных математических открытиях, сделанных в самое последнее время во всем мире. Так вот, комплект этого журнала за 1958 г. представляет собой огромный том (свыше 1600 страниц большого формата!), содержащий более 9000 рефератов. Так велико число математических открытий, сделанных всего за один год: в среднем по 30 открытий в день! Конечно, не все они одинаково значительны, но все-таки почти каждое из них означает продвижение науки вперед, пусть иногда даже на совсем маленький шажок.

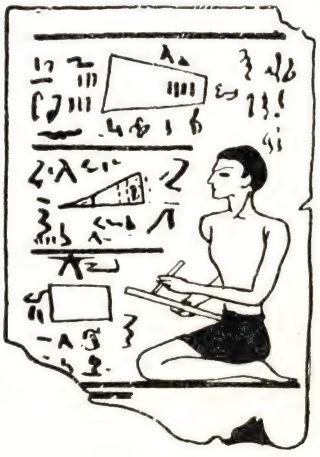
Такое бурное развитие математики тесно связано с тем, что теория и практика выдвигают все новые и новые задачи, которые математики должны решать. И вот, когда старых знаний не хватает, приходится изобретать новые пути, находить новые средства, создавать новые методы. Ныне математика применяется не только в астрономии, механике, физике, химии и технике, где она применялась и раньше, но также в биологии, некоторых отраслях общественных наук и даже в языкознании. Особенно большое поле для ее применений открылось в связи с созданием быстродействующих электронных вычислительных машин. Они предсказывают погоду, вычисляют орбиты искусственных спутников, переводят научные тексты с одного языка на другой.

В ближайшее время новые типы вычислительных универсальных и специализированных машин будут широко применяться в самых разнообразных областях человеческой деятельности, в том числе для управления производственными процессами, для статистического и бухгалтерского учета, плановых и проектных расчетов.

Коротко математику можно охарактеризовать как науку о числах и фигурах. Трудно назвать такую отрасль человеческой деятельности, где не приходилось бы ставить и решать вопросы о количестве предметов, об их размерах и форме. С глубокой древности, по мере развития человеческого общества, накапливалось все больше сведений о числах, о размерах и формах различных предметов. Появилась необходимость приводить эти сведения в порядок, чтобы их легче было передавать от одного поколения другому. Так постепенно зарождалась математика.

Начатки математических знаний обнаруживаются уже примерно за четыре тысячи лет до нашего времени. Об этом свидетельствуют дошедшие до нас египетские папирусы, клинописные вавилонские таблички, где встречаются решения различных арифметических, геометрических и алгебраических задач.

Большого расцвета математика достигла в Древней Греции. Более чем за 300 лет до н. э. здесь появились «Начала» Евклида — сочинение, в котором систематически излагалась геометрия в том примерно объеме, в каком она ныне изучается в средней школе, а также давались сведения о делимости чисел и о решении квадратных уравнений (в геометрической форме). В III в. до н. э. Архимед нашел способ определения площадей, объемов и центров тяжести различных простых фигур. В конце III в. до н. э. Аполлоний написал книгу о свойствах некоторых замечательных кривых — эллипса, гиперболы и



параболы. Если к этому добавить еще, что во II в. н. э. Птолемей в астрономическом сочинении, известном под арабским названием «Альмагест», изложил основы тригонометрии, дал таблицы синусов (вернее, длин хорд окружности) и способы решения сферических треугольников (т. е. треугольников, сторонами которых являются дуги больших кругов, проведенных на шаре), то станет ясным, какой большой вклад в развитие математических знаний внесли древние греки за много столетий до нашего времени. Можно смело утверждать, что нынешние школьники изучают за все время пребывания в средней школе лишь небольшую часть этих знаний (правда, они получают также некоторые сведения, которые древним грекам были неизвестны).

Но, конечно, развитие науки на этом не остановилось. Трудами китайских, индийских, арабских ученых математика продолжала развиваться (особенно больших успехов добились индийцы и арабы в развитии алгебры и тригонометрии). Ученым Западной Европы после длительного застоя в развитии науки во времена средневековья пришлось затратить немало усилий, чтобы усвоить труды их предшественников. Лишь после этого они смогли двигаться вперед самостоятельно. Расцвет математики в Европе начинается с XVII в. В это время зарождаются новые отрасли математики, которые относятся к так называемой высшей математике и изучаются ныне в высших учебных заведениях. Особенно глубоко высшая математика изучается на физико-математических факультетах университетов и педагогических институтов, некоторые ее разделы проходят в высших технических учебных заведениях.

Основу высшей математики составляют аналитическая геометрия и дифференциальное и интегральное исчисления. Их создание, связанное с именами великих ученых XVII в.— Декарта, Ферма, Ньютона и Лейбница,— позволило математически изучать движение, процессы изменения величин и геометрических фигур. Вместе с этим в математику вошли координаты, переменные величины и понятие функции. С понятием координат, переменными величинами и понятием функции школьники знакомятся в курсе алгебры и тригонометрии. Но при этом они остаются лишь у порога той высшей математики, которая в течение последних трехсот лет проявила себя как незаменимый инструмент исключительной силы и тонкости, позволивший сменяющим друг друга поколениям астрономов, физиков, механиков и представителей других областей знания решать труднейшие проблемы естествознания и техники.

Невозможно проследить здесь, хотя бы и бегло, успехи математики за последние столетия. Отметим большой вклад, внесенный русскими учеными Н. И. Лобачевским, П. Л. Чебышевым и советскими математиками. Можно сказать, что современная математика достигла такой степени развития и так богата содержанием, что одному человеку, даже са́мому ученому, нельзя охватить ее всю и приходится специализироваться в какой-либо определенной ее области.

Надо заметить, что современная математика состоит не только из «алгебры» и «геометрии», как школьный курс; сейчас насчитывается несколько десятков различных областей математики, каждая из которых имеет

свое особое содержание, свои методы и области применения.

В разделе тома, посвященном математике и названном «Числа и фигуры», мы поместили несколько статей, тесно связанных со школьным курсом математики, дополняющих и углубляющих те знания, которые читатель уже имеет. Но мы считали необходимым также приподнять завесу, отделяющую «элементарную», школьную математику от математики «высшей».

Мы понимаем, что некоторые из наших статей нельзя назвать простыми и легкодоступными. Мы советуем при чтении таких статей вооружиться терпением, а также бумагой и карандашом и одолевать их шаг за шагом. Если читатель и тут потерпит неудачу — отчаиваться не следует. Можно вспомнить слова, с которыми знаменитый французский математик Лагранж обращался к молодым математикам: «Читайте, понимание придет потом».

Во всяком случае, мы надеемся, что каждый молодой любитель математики найдет ниже такие статьи, которые будут для него сразу же доступны. Что касается остальных, то к ним можно обратиться позже, когда читатель продвинется вперед в школьном курсе. Словом, «понимание придет»!

Числа

КАК ЛЮДИ СЧИТАЛИ В СТАРИНУ И КАК ПИСАЛИ ЦИФРЫ

Все числа мы привыкли записывать с помощью десяти знаков-цифр: 0, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9. Например, число, состоящее из четырех сотен, четырех десятков и четырех единиц, мы записываем так: 444. При этом один и тот же знак «4» обозначает соответствующее число единиц, если он стоит на последнем месте, число десятков — если на предпоследнем, и число десятков десятков, т. е. сотен,— если он стоит на третьем месте от конца. Такой принцип записи чисел называется позиционным или поместным, потому что каждая цифра получает числовое значение не только в зависимости от своего начертания, но и от того, на каком месте она стоит при записи числа. Позиционный принцип позволяет с помощью десяти знаков-цифр записать любое сколь угодно большое число. Действительно, пусть нам дано целое число N. Для того чтобы записать его в нашей системе, находим сначала остаток от деления N на 10, затем остаток от деления частного на 10 и т. д. до тех пор, пока в качестве частного не получим числа, меньшего десяти. Например:

$$N = 523 = 10 \cdot 52 + 3$$
$$52 = 10 \cdot 5 + 2$$
$$5 = 10 \cdot 0 + 5$$

Полученные остатки и являются последовательными цифрами нашего числа, записанного в позиционной десятичной системе

$$N = 523,$$

или, более подробно,

$$N = 5 \cdot 10^2 + 2 \cdot 10 + 3.$$

Для тех, кто знаком с алгеброй, скажем, что каждое число M можно представить в таком же виде.

Если $10^n \leqslant M < 10^{n+1}$, то

$$M = a_n 10^n + a_{n-1} 10^{n-1} + \ldots + a_1 10 + a_0,$$

где каждый из коэффициентов a_0, a_1, ..., a_n меньше 10 (это просто остатки от последовательного деления числа M на 10). Следовательно, каждый из коэффициентов мы запишем с помощью одной из наших десяти цифр. Следуя десятичному позиционному принципу, мы записываем число M так:

$$a_n a_{n-1} \ldots a_1 a_0,$$

где a_0 означает число обычных единиц, или единиц первого разряда, содержащихся в M, a_1 — число единиц второго разряда, т. е. десятков, a_2 — число единиц третьего разряда, т. е. сотен, и т. д.

Число 10 называется основанием нашей системы.

Итак, для записи чисел мы пользуемся десятичной позиционной системой счисления.

СЧЕТ ДВОЙКАМИ, ТРОЙКАМИ И ДЮЖИНАМИ

Однако вовсе не обязательно считать десятками. Можно, например, вести счет двойками или тройками. Для этого за основание системы счисления примем число 2 или 3, а в остальном будем поступать точно так же, как мы это делали, когда основание равнялось десяти.

Для записи по двоичной системе нам понадобятся всего две цифры: 0 и 1. Число «два» мы запишем в этой системе как 10. А чтобы не спутать нашу запись с обычной, будем справа внизу ставить маленькую цифру 2 — это будет означать, что основанием системы служит число «два». Итак, 10_2 будет записью числа 2. Число $3 = 1 \cdot 2 + 1$, т. е. его записью будет 11_2.

Число $4 = 2^2 + 0 \cdot 2 + 0 \cdot 1$, т. е. оно запишется в виде 100_2. Записью числа 5 будет 101_2, а числа 7 — 111_2.

Чтобы найти запись любого числа N, нужно определить остатки от последовательного деления этого числа на 2. Мы предоставляем читателям проверить, что записью числа 35 в двоичной системе будет 100011_2.

Если число N таково, что

$$2^n \leqslant N < 2^{n+1},$$

то, деля его последовательно на 2, получим:

$$N = a_n 2^n + a_{n-1} 2^{n-1} + \ldots + a_1 2 + a_0,$$

т. е. запись этого числа в двоичной системе будет иметь вид

$$a_n a_{n-1} \ldots a_1 a_0,$$

но здесь уже каждый из коэффициентов может принимать только два значения: 0 или 1.

Более подробно о двоичной системе, которая сейчас приобрела большое значение в связи с ее применением в быстродействующих счетных машинах, вы узнаете, если прочтете статью «Электронные счетные машины», помещенную в этом же томе Детской энциклопедии. А мы теперь перейдем к системам с другим основанием.

Для записи числа в троичной системе нужны три цифры, например 0, 1, 2. Число «три» здесь будет записываться как 10_3, а «четыре» — как 11_3. Записью числа 35 в этой системе будет 1022_3.

Приведем таблицы сложения и умножения чисел, записанных по троичной системе:

Таблица сложения

	1	2
1	2_3	10_3
2	10_3	11_3

Таблица умножения

	1	2
1	1_3	2_3
2	2_3	11_3

Но можно считать и дюжинами, т. е. пользоваться системой счисления с основанием двенадцать. Еще не так давно у нас в России и в Западной Европе некоторые предметы, например перья и карандаши, принято было считать дюжинами. Сервизы тоже обычно составляют из 12 чашек, 12 блюдцев, 12 тарелок, а комплекты мебели — из 12 стульев или кресел. Существовало даже специальное название для дюжины дюжин — гросс.

Посмотрим, как будут изображаться числа в этой системе. Во-первых, в ней должно быть 12 цифр. Значит, к нашим десяти цифрам надо прибавить еще две, например *А* для обозначения десяти и *Б* — для одиннадцати. Во-вторых, запись чисел в ней будет короче, чем в нашей системе, а таблица умножения длиннее. Число 12 запишется как 10_{12} (мы снова ставим значок 12 для того, чтобы знать, в какой системе

сделана запись), число 13 — как 11_{12}, число $35=2\cdot12+11$ — как $2Б_{12}$, а число $133=11\cdot12+1$ — как $Б1_{12}$, т. е. оно станет двузначным. Приведем таблицу умножения чисел, записанных в этой системе[1]:

	2	3	4	5	6	7	8	9	А	Б
2	4	6	8	А	10	12	14	16	18	1А
3	6	9	10	13	16	19	20	23	26	29
4	8	10	14	18	20	24	28	30	34	38
5	А	13	18	21	26	2Б	34	39	42	47
6	10	16	20	26	30	36	40	46	50	56
7	12	19	24	2Б	36	41	48	53	5А	65
8	14	20	28	34	40	48	54	60	68	74
9	16	23	30	39	46	53	60	69	76	83
А	18	26	34	42	50	5А	68	76	84	92
Б	1А	29	38	47	56	65	74	83	92	А1

Двенадцатеричная система счисления когда-то довольно широко применялась. Об этом свидетельствуют такие факты: мы до сих пор делим год на 12 месяцев, а сутки на 24 часа, причем в повседневной жизни часы мы считаем только до 12, а затем начинаем счет сначала (час дня, два часа дня и т. д.). Число 12 часто встречается также в сказках и легендах (двенадцатиглавый змей, двенадцать братьев-разбойников), что тоже свидетельствует о древнем происхождении двенадцатеричной системы счисления.

Некоторые ученые считали, что такая система была бы удобнее, чем десятичная, так как число 12 имеет больше делителей, чем число 10. На самом же деле это обстоятельство не дает никаких особых преимуществ.

Ниже мы расскажем о том, что когда-то существовали нумерации с основанием 20 и даже 60.

А теперь сделаем некоторые общие выводы: 1) всякое число, отличное от единицы, может служить основанием позиционной системы счисления; 2) в системе счисления должно быть столько цифр, сколько единиц содержится в основании системы.

Несмотря на то, что принципиально все позиционные системы счисления равноправны, в разных случаях удобнее пользоваться разными системами. Например, как мы уже говорили, при счете на электронных машинах в основном пользуются двоичной системой.

Сейчас мы приведем несколько задач, для решения которых удобнее будет воспользоваться не десятичной системой счисления, а другими.

ЗАДАЧА НА ВЗВЕШИВАНИЕ

Вот одна из классических задач, решить которую можно сразу же, если выбрать систему счисления с подходящим основанием. Эта задача приведена в математической книге знаменитого математика XIII в. Леонардо Пизанского. Ею интересовался также великий Эйлер.

Требуется выбрать 5 гирь так, чтобы с их помощью можно было взвесить любой груз до 30 *кГ* при условии, что гири ставятся только на одну чашку весов.

Какие же гири нужно выбрать?

Сумма веса всех гирь должна быть не меньше 30 *кГ*. Но, конечно, этого далеко не достаточно. Если мы выберем, например, гири весом в 1 *кГ*, 2 *кГ*, 3 *кГ*, 10 *кГ* и 15 *кГ*, то с их помощью нельзя будет взвесить грузы в 7 *кГ*, 8 *кГ*, 9 *кГ*, 22 *кГ*, 23 *кГ* и 24 *кГ*.

Разберем математический смысл задачи. Чтобы взвесить некоторый груз, помещая гири только на одну чашку весов, надо представить его вес в виде суммы весов имеющихся гирь,

Леонардо Пизанский.

[1] При записи этой таблицы мы опускаем значок 12 Но не надо забывать, что все числа записаны в двенадцатеричной системе.

причем так, чтобы каждая гиря бралась не более одного раза. Если выбранные нами гири имеют вес p_1, p_2, p_3, p_4, p_5, то груз весом $Q \leqslant 30$ *кГ* должен представляться так:

$$Q = a_1p_1 + a_2p_2 + a_3p_3 + a_4p_4 + a_5p_5,$$

где каждый коэффициент равен единице, если мы кладем соответствующую гирю на чашку весов, и нулю, если мы ею не пользуемся при взвешивании.

При такой постановке вопроса видно сходство с представлением числа Q в двоичной системе счисления. Нужно только в качестве p_1, p_2, p_3, p_4, p_5 взять гири весом:

$$p_1 = 1\,кГ,\quad p_2 = 2\ кГ,\quad p_3 = 4\ кГ,\quad p_4 = 8\ кГ,\quad p_5 = 16\,кГ.$$

Сумма их веса $1+2+4+8+16=31>30$ *кГ*. Кроме того, каждое число Q, не большее 31, можно представить в виде

$$Q = b_4 2^4 + b_3 2^3 + b_2 2^2 + b_1 2 + b_0,$$

где каждый из коэффициентов b_0, b_1, b_2, b_3, b_4 будет, как нам и нужно, либо нулем, либо единицей.

Пусть, например, надо взвесить груз в 22 *кГ*. Запишем число 22 по двоичной системе:

$$22 = 10110_2.$$

Значит, нужно взять гири $p_2=2\,кГ$, $p_3=4$ *кГ* и $p_5=16$ *кГ*.

Теперь несколько видоизменим задачу: пусть требуется выбрать 4 гири, с помощью которых можно было бы взвесить любой груз до 40 *кГ*, при условии, что гири можно класть и на левую и на правую чашку весов.

Нетрудно убедиться, что для решения этой задачи нужно воспользоваться троичной системой счисления, т. е. выбрать следующие 4 гири:

$$p_1=1\ кГ,\quad p_2=3\ кГ,\quad p_3=9\ кГ,\quad p_4=27\ кГ.$$

Пусть, например, надо взвесить груз в 19 *кГ*. Число 19 представим в виде

$$19 = 3\cdot 6+1 = 3\cdot(3\cdot 2)+1 = 2\cdot 9+1 = \\ = 0\cdot 27+2\cdot 9+0\cdot 3+1 = 201_3.$$

Теперь груз в 19 *кГ* кладем на правую чашку весов. На левую кладем груз в 1 *кГ*. Затем надо было бы положить туда еще 2 гири по 9 *кГ*, но у нас имеется только одна такая гиря.

Но $18=2\cdot 9$ можно представить еще и иначе:

$$18 = 2\cdot 9 = (3-1)\cdot 9 = 27-9,$$

т. е. на левую чашку весов надо положить еще гирю в 27 *кГ*, на правую — в 9 *кГ*.

И русский, и француз, и немец одно и то же число назовут по-разному (на своем языке), а запишут его одинаково.

Так же будем поступать и в других случаях. Если $Q \leqslant 40$ *кГ*, то его можно всегда представить в виде

$$Q = b_3 3^3 + b_2 3^2 + b_1 3 + b_0,$$

где каждый из коэффициентов b_0, b_1, b_2, b_3 может равняться 0, 1 или 2. Если он равен нулю, то соответствующую гирю отставляем в сторону; если — единице, то кладем ее на левую чашку весов; если — двум, то поступаем так, как мы это только что делали, т. е. кладем гирю на правую чашку весов, а следующую по величине гирю — на левую.

Следует помнить, что, хотя в различных системах счисления числа записываются по-разному, основные свойства их от этого не меняются: так, число 20 будет делиться на 2 в какой бы системе мы ни записали это число, а 27 не будет делиться на 2, но будет делиться на 3. Числа 3, 5 и 7 останутся простыми в любых системах счисления. Однако признаки делимости, которые устанавливаются, исходя из записи числа в определенной системе счисления, будут меняться вместе с основанием системы. Так число делится на 5, если его запись по десятичной позиционной системе оканчивается нулем или пятеркой. Но число не всегда делится на 5, если на нуль оканчивается его запись в троичной системе, например числа 10_3 (т. е. 3), 100_3 (т. е. 9), 1000_3 (т. е. 27) не делятся на 5, а число 120_3 (т. е. 15) будет делиться на 5.

НАШ УСТНЫЙ СЧЕТ

Теперь перед нами, естественно, возникает вопрос: почему мы все-таки пользуемся десятичной системой, а не системой с другим основанием? И еще: всегда ли люди записывали числа, пользуясь позиционным принципом?

На эти вопросы мы и постараемся теперь дать ответ.

Чтобы лучше понять, как люди считали в старину, обратимся сначала к нашей речи, к нашему устному счету. Прежде всего заметим, что наш устный счет очень отличается от письменного.

Как мы называем число 444? Мы говорим: «Четыреста сорок четыре», т. е. произносим три разных слова. В то же время это число мы записываем тремя одинаковыми знаками. Если то же самое число нужно будет записать немцу или французу, то они напишут такие же три знака, а произнесет каждый из них три различных слова, один — по-немецки, другой — по-французски.

Итак, наша письменная нумерация носит международный характер, тогда как названия числительных и способы их образования у разных народов различны. Но дело не только в этом. Давайте рассмотрим более подробно, как мы называем числа. Для нуля и первых девяти чисел мы употребляем специальные названия: «нуль», «один», «два», ..., «девять»; для следующего числа у нас есть новое слово — «десять»; мы не говорим «один, нуль», хотя и записываем его с помощью единицы и нуля: 10.

Все числа от 11 до 99, как правило, составляются из названий первых чисел: «одиннадцать» (т. е. один-на-десять), «тридцать один» (т. е. три-десять-один) и т. д. Для 100 мы употребляем новое слово — «сто». Все числа от 101 до 999 опять составные, а для 1000 снова вводится слово «тысяча». Далее тоже идут новые слова: «миллион», «биллион», «триллион» и т. д. Как видим, по мере роста самих чисел возрастает и количество названий для них. Из этого явствует, что способ наименования чисел не является позиционным. Наш устный счет сохранил следы каких-то более старых нумераций, одной из которых мы и сейчас пользуемся при записи чисел по римской системе. Здесь имеются специальные знаки для единицы (I), пяти (V), десяти (X), пятидесяти (L), ста (C), пятисот (D) и тысячи (M). Остальные числа записываются при помощи этих символов с применением сложения и вычитания: III, например, есть запись числа три (I+I+I), IV — числа четыре (V—I), VI—числа шесть (V+I), и т. д. Наше число 444 запишется в римской системе так: CDXLIV.

Эта форма записи менее удобна, чем та, которой мы теперь пользуемся. Здесь четыре единицы записываются одними символами (IV), четыре десятка — другими (XL), четыре сотни — третьими (CD). Запись чисел получается намного длиннее. Но не только в этом дело: с числами, записанными в римской нумерации, очень трудно производить арифметические действия. Попробуйте, например, перемножить 444 на 36, если оба числа обозначены римскими цифрами, и вы сразу же убедитесь в трудности задачи. Сами римляне пользовались для производства арифметических операций специальной счетной доской — абаком.

В римской системе есть и еще один существенный недостаток: она не дает способа для записи сколь угодно больших чисел. Например, чтобы написать по этой системе 1 000 000, надо либо 1000 раз повторить знак M, либо ввести новый символ. Таким образом, для записи чисел по мере их роста надо будет вводить все новые и новые знаки. Это происходит потому, что римская нумерация не является позиционной. Знак V, например, означает в ней только пять единиц и не может обозначать пяти десятков или пяти сотен. Римская нумерация не является и строго десятичной. В ней сохранились следы другого основания — пяти. Действительно, здесь есть специальные знаки для пяти, пятидесяти и пятисот.

В нашем устном счете имеются некоторые черты, напоминающие эту систему. Так, мы тоже прибегаем к операции сложения, образуя числительные от 11 до 19: «одиннадцать» (один-на-десять) и т. д. Но начиная с 20 мы пользуемся для образования числительных еще и умножением, чего нет в римской системе: «двадцать» означает два-десять, т. е. два×десять, «тридцать» — три×десять.

В нашем языке сохранились также следы нумерации с основанием 40, которой пользовались наши предки. Действительно, для этого числа употребляется новое, несоставное название — «сорок», нам известны такие выражения: «сорок сороков церквей», «сорок сороков черных соболей». О том, что число 40 когда-то играло особую роль при счете, говорят и некоторые связанные с ним поверья. Так, сорок первый медведь считался роковым для охотника. Аналогично этому, широко распространен у европейских народов предрассудок, будто число 13 является несчастливым. Это связано с тем, что некогда была распространена двенадцатеричная система счисления.

Во французском языке сохранились следы

нумерации с основанием 20; число 80 читается: quatre-vingts — «четыре-двадцать», число 90: quatre-vingts-dix — «четыре-двадцать-десять», число 120 — «шесть-двадцать»; в старофранцузском языке и другие названия чисел составлялись аналогичным образом. Следы двадцатеричной системы сохранились также в английском и голландском языках, следы пятеричной — в скандинавских языках.

Итак, устная речь показывает, что наши предки пользовались непозиционной нумерацией, причем в качестве оснований, кроме десяти, были и другие числа.

На основании каких же источников можно ответить на вопрос: как люди считали в старину?

Во-первых, на земном шаре сохранились народы, которые еще недавно стояли во многих отношениях на таком же низком уровне развития, как и наши далекие предки. Многие путешественники и исследователи описали немало способов счета, применявшихся у таких народов. Это — один источник, с которым мы познакомимся.

Вторым источником являются письменные документы древних народов: египтян, вавилонян, древних греков, индейцев племени майя и др. Наконец, русские рукописи XI—XII вв. помогут нам узнать, как считали раньше в России. Итак, начнем по порядку.

СЧЕТ У ПЕРВОБЫТНЫХ НАРОДОВ

Еще недавно существовали племена, в языке которых были названия только двух чисел: «один» и «два». Но это не значит, конечно, что представители племени не могли сосчитать большее количество предметов.

У туземцев островов, расположенных в Торресовом проливе, единственными числительными являлись «урапун» (один) и «окоза» (два). Островитяне считали так: «окоза-урапун» (три), «окоза-окоза» (четыре), «окоза-окоза-урапун» (пять) и «окоза-окоза-окоза» (шесть). О числах начиная с 7 туземцы говорили «много», «множество». Таким образом, люди здесь освоили только конечное число целых чисел. Кстати, многие русские пословицы говорят о том, что именно так дело обстояло и у наших предков. Мы говорим: «У семи нянек дитя без глаза», «Семь бед — один ответ», «Семеро одного не ждут», «Семь раз отмерь, один раз отрежь». Здесь, очевидно, число «семь» употребляется в смысле «много»: у большого числа нянек дитя без глаза, много бед — один ответ и т. д.

Но вернемся к нашему рассказу.

Очень рано у людей появилась необходимость сообщать друг другу о том, что такое-то число предметов должно быть доставлено через столько-то дней или что каждое племя должно выставить такое-то число воинов. И даже те народы, у которых имелось только два числительных, умели в известном смысле «сосчитывать» довольно большое количество предметов. Вот как, по рассказу замечательного русского путешественника Н. Н. Миклухо-Маклая, поступали туземцы Новой Гвинеи: «Излюбленный способ счета состоит в том, что папуас загибает один за другим пальцы руки, причем издает определенный звук, например «бе-бе-бе»... Досчитав до пяти, он говорит «ибон-бе» (рука). Затем он загибает пальцы другой руки, снова повторяет «бе-бе»... пока не доходит до «ибон-али» (две руки). Затем он идет дальше, приговаривая «бе-бе», пока не доходит до «самба-бе» и «самба-али» (одна нога, две ноги). Если нужно считать дальше, папуас пользуется пальцами рук и ног кого-нибудь другого».

Итак, предметы при счете сопоставлялись обычно с пальцами рук и ног. При переговорах туземцу достаточно было сказать, например, что он дошел в своем счете до третьего пальца правой ноги. Тогда, чтобы отсчитать нужное количество предметов, счет начинали сначала, от первого пальца правой руки. При этом, отсчитывая каждый палец, одновременно считали и предметы. Островитяне Торресова пролива для такого пересчета употребляли не только пальцы, а и другие части тела (запястье, локоть, плечо), но всегда в определенном порядке. Так они могли пересчитывать до 33 предметов.

Суть этого способа заключается в том, что равночисленность некоторых совокупностей предметов устанавливалась при помощи сопоставления их с частями тела, а иногда и просто палочками. Разумеется, наиболее удобным «инструментом» пересчета являются пальцы, вследствие чего предметы при пересчете чаще всего группировали по пяти, по десяти и по двадцати. Этим и объясняется то, что основанием большинства сложившихся систем счисления является 10 (по числу пальцев на обеих руках), а иногда 5 или 20.

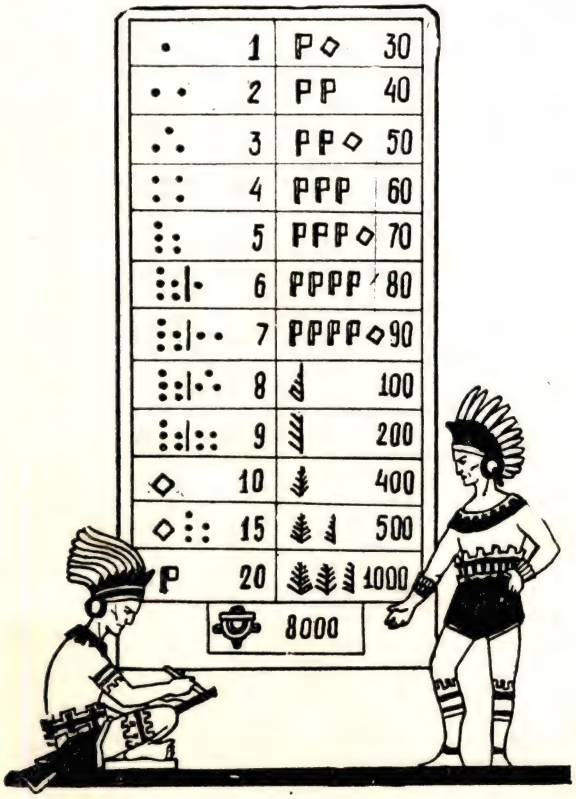
Со временем хозяйство племен становилось все более сложным и обширным. Чаще приходилось сосчитывать все большее количество различных предметов, и простое установление

Н. Н. Миклухо-Маклай среди папуасов.

равночисленности при помощи счета на пальцах перестало удовлетворять людей.

Люди постепенно привыкали при счете располагать предметы устойчивыми группами по два, по десяти или двенадцати. Появились специальные слова для обозначения таких устойчивых совокупностей предметов. Так, у туземцев Флориды слово «на-куа» означало 10 яиц, «на-банара» — 10 корзин. Но слово «на», которое, казалось бы, соответствует числу 10, отдельно не употреблялось. То же можно было наблюдать на о-вах Фиджи и Соломоновых, где имелись специальные названия для 100 челноков, 100 кокосовых орехов, 1000 кокосовых орехов и в то же время отвлеченных чисел не было. Числа являлись, по существу, именованными, это еще «числа-совокупности» конкретных предметов.

Но с течением времени такими устойчивыми «числами-совокупностями» начали обозначать не только данные предметы, но и другие, похожие на них. Например, «числа-совокупности», обозначающие определенное количество орехов, могли впоследствии употребляться для счета круглых предметов. Это привело к тому, что во многих языках первобытных народов образовалось несколько рядов числительных: одни из них употреблялись только для счета людей, другие — для подсчета круглых предметов, третьи — продолговатых и т. д. Так, например, у чишмиенов (Британская Колумбия) имелось семь видов числительных, каждый из которых употреблялся для счета предметов определенного вида.



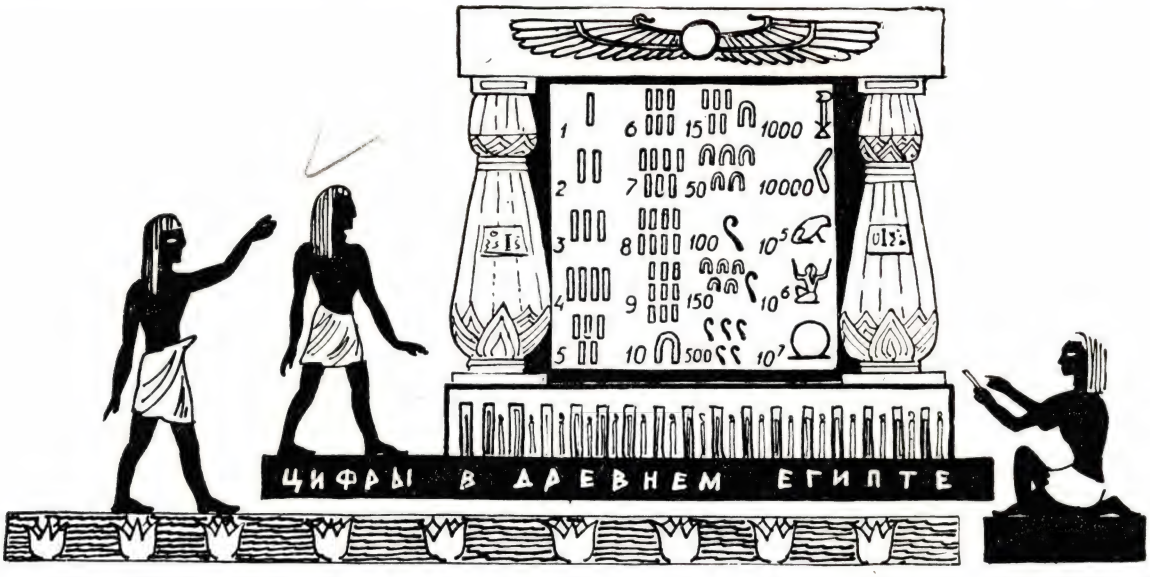
Так обозначали числа индейцы племени ацтеков (Мексика) в XI-XVI вв.

Однако у большинства народов числа, которыми считали «деньги», постепенно вытеснили все остальные. По-видимому, это произошло тогда, когда в качестве денег в основном служил скот: приходилось сосчитывать стада, обменивать на них другие предметы. Естественно, что числа, служившие для подсчета скота, получили наибольшее распространение: их все хорошо знали. Они-то и стали теми универсальными числами, которые позволили считать любые предметы.

Однако так образовались только те числа, которым соответствовали «числа-совокупности»: если счет велся десятками, то появились названия для десяти, десяти десятков (т. е. ста), десяти сотен (т. е. тысячи). Кроме того, индивидуальные названия получили, как правило, все числа, меньшие десяти. Что касается чисел 11, 12, ..., 19, 21 и т. д., то они с самого начала составлялись из основных при помощи тех операций, которые первоначально фактически производились над пересчитываемыми предметами. Так, на языке кламатов (Северная Америка), а также племен Британской Колумбии для обозначения таких составных чисел употреблялись специальные глаголы. Например, индеец говорил: «На дважды десять плодов я кладу сверху шесть»,—и это обозначало 26 плодов. Такая фраза полностью соответствует фактическому пересчету: индейцы располагали 10 предметов в ряд, с одиннадцатого начинался новый ряд и т. д. А постепенно эти двигательные операции перешли в арифметические.

Хорошей иллюстрацией к такому способу счета служат обозначения чисел, принятые в XI—XVI вв. индейцами племени ацтеков (Мексика): единицу они обозначали точкой, двойку — двумя точками (см. рисунок) и т. д. до пяти.

В запись числа 6 входила вертикальная черта, которая отделяла пять первых точек от шестой. Ясно, что здесь счет велся группами по пяти предметов. Черта отделяла одну такую



группу от другой, причем сама черта никакого числа не обозначала.

Основной операцией для образования составных чисел было сложение, но наряду с этим применялось и вычитание, а иногда даже умножение. Например, в русском языке, как мы уже говорили, для образования числительных употребляются и сложение и умножение (двадцать семь: два×десять+семь). В угро-финских языках применяется и вычитание: число 8 там произносится как «два-десять» (т. е. десять без двух), 80 — как «два-сто», 800 — «два-десять-сто» («десять-сто», т. е. тысяча,— принцип умножения!). Так происходило освоение натурального ряда чисел. Посмотрим теперь, какими были первые записи чисел и как люди оперировали числами.

ПЕРВЫЕ НУМЕРАЦИИ

Одна из древнейших нумераций — египетская. До нас дошли надписи, сохранившиеся внутри пирамид, на плитах и обелисках. Они состоят из картинок-иероглифов, которые изображают птиц, зверей, людей, части человеческого тела (глаза, ноги) и различные неодушевленные предметы. Такой способ письма вообще характерен для ранних ступеней культуры. Подобные письмена были у обитателей Центральной Америки — индейцев племени майя, в Перу, в Древнем Китае. Расшифровка их представляет огромные трудности, так как часто неизвестны ни язык древних народов, ни значение отдельных иероглифов. Казалось бы, задача является неразрешимой. И все-таки многие надписи уже прочитаны! Сначала были разгаданы письмена древних египтян, затем — вавилонская клинопись. В 30-х гг. нашего века чешский ученый Грозный прочел долго не поддававшиеся расшифровке хеттские надписи. И, наконец, совсем недавно советский ученый Кнорозов нашел ключ к разгадке письмен индейцев племени майя и надписям с острова Пасхи.

Сохранились два математических папируса, которые позволяют судить о том, как считали древние египтяне. Один из них хранится в Британском музее, а другой—в Музее изобразительных искусств в Москве.

Для записи чисел древние египтяне употребляли следующие иероглифы, означающие (последовательно): единица, десять, сто, тысяча, десять тысяч, сто тысяч (лягушка), миллион (человек с поднятыми руками), десять миллионов.

Полагают, что иероглиф для сотни изображает измерительную веревку, для тысячи — цветок лотоса, для 10 000 — поднятый кверху палец, а для 10 000 000—всю Вселенную. Все остальные числа составлялись из основных с помощью только одной операции — сложения. При этом запись производилась не слева напра-

Так написали бы 444 древние египтяне.

во, как у нас, а справа налево. Число 15, например, записывалось так:

А число 444 писали так:

Мы видим, что древнеегипетская нумерация похожа на римскую, только при записи чисел не употребляется вычитание.

Знакомясь с римской нумерацией, мы убедились, до чего неудобно умножать числа, записанные в непозиционной системе. Как же считали древние египтяне? Оказывается, умножение и деление они производили путем последовательного удвоения чисел. Пусть, например, надо умножить 19 на 37. Египтяне последовательно удваивали число 37, причем в правом столбце записывали результаты удвоения, а в левом — соответствующие степени двойки:

1	37
2	74
4	148
8	296
16	592

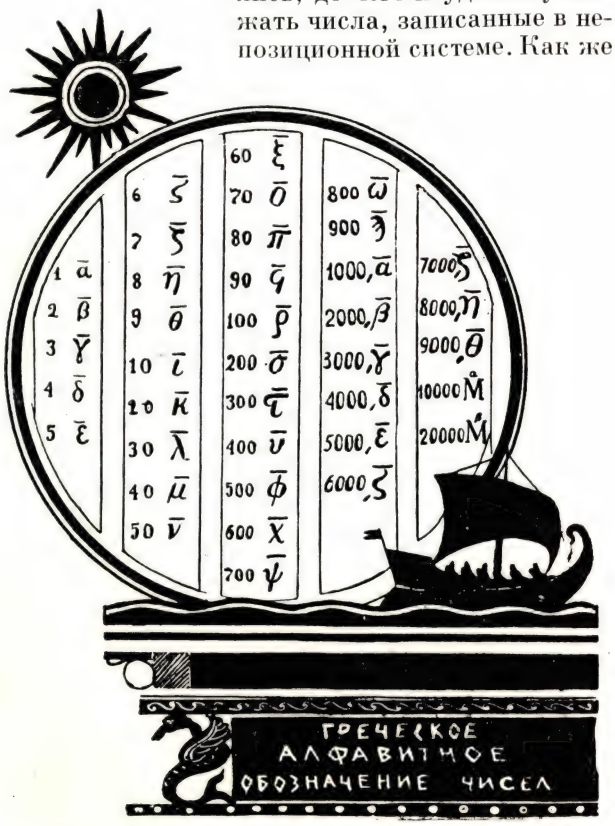
Удвоение продолжалось до тех пор, пока не оказывалось, что из чисел левого столбца можно составить множитель (в нашем примере 19=1+2+16). Египтяне отмечали соответствующие строки вертикальными черточками и складывали те числа, которые стоят в этих же строках справа. В данном случае надо сложить 37+74+592=703. Так получали произведение.

Если теперь число 703 нужно было разделить на 19, то египтяне начинали последовательно удваивать делитель и продолжали это до тех пор, пока числа правого столбца оставались меньше 703. Затем из чисел правого столбца они пытались составить делимое, и тогда сумма соответствующих чисел в левом столбце давала делитель:

1	19
2	38
4	76
8	152
16	304
32	608

В данном случае 703=608+76+19, т. е. частное будет 1+4+32=37. Если бы делимое не делилось без остатка на делитель, то его не удалось бы составить из чисел правого столбца. У нас получилось бы и частное и остаток.

Египетский способ умножения не труден, но он требует очень большого количества операций, даже при умножении двузначных чисел. Если бы пришлось перемножать таким же образом очень большие числа, мы не могли бы обойтись без помощи машины. Заметим также, что для умножения и деления египтяне пользовались фактически представлением числа по двоичной системе.



АЛФАВИТНЫЕ НУМЕРАЦИИ. ПСАММИТ

Мы видели, что непозиционные нумерации малоудобны: запись чисел в них очень длинна, арифметические операции производить трудно.

По мере развития торговли и ремесла эти неудобства становились все чувствительнее, и вот в Малой Азии, где были древнегреческие колонии, которые вели оживленную торговлю, в середине V в. до н. э. появилась система счисления нового типа, так называемая алфавитная нумерация. Ее обычно называют и о н и й с к о й. В этой системе числа обозначались при помощи букв алфавита, над которыми ставились черточки: первые девять букв обозначали числа от 1 до 9, следующие девять — числа 10, 20, 30 до 90 и следующие девять — числа 100, 200 до 900. Таким образом можно было обозначать любое число до 999.

Так записывались числа в древнеславянской нумерации.

Для обозначения чисел 1000, 2000, ..., 9000 греки употребляли те же буквы, что и для чисел 1, 2, ..., 9, но только при их записи ставили косую черточку слева внизу. Как это делалось, видно из прилагаемого рисунка. Далее, для числа 10 000 употреблялся знак $\overset{\alpha}{M}$ — это число называлось мириадой, две мириады, т. е. 20 000, обозначались так: $\overset{\beta}{M}$. Этим способом можно было обозначить все числа до мириады мириад, т. е. до 10^8. Более высокие десятичные разряды уже не могли быть записаны в ионийской нумерации и не имели названия в древнегреческом языке.

Великий математик, механик и инженер древности Архимед (III в. до н. э.) посвятил целое сочинение тому, чтобы дать общий прием наименования сколь угодно больших чисел. Издавна у греков, как, впрочем, и у других народов, наглядным образом для представления об очень большом и даже неисчислимом количестве служило число песчинок.

В народных сказках, например, встречается «неразрешимая» задача: сосчитать звезды на небе, капли в море или песчинки на земле. Архимед показал, что такие задачи можно решить. Свое сочинение он так и назвал «Исчисление песка» («Псаммит»). В нем он построил систему счета, в которой имелись числа, не только превосходящие количество песчинок в его родной Сицилии, но и такие, которые больше числа песчинок во Вселенной, если даже считать, что Вселенная сплошь заполнена песком. Но что же понимали греки времен Архимеда под всей Вселенной? В своем сочинении Архимед, следуя за греческим астрономом Аристархом Самосским, полагал, что в центре Вселенной находится Солнце, а Земля и другие планеты вращаются вокруг него. Вселенная имеет форму сферы, на поверхности которой расположены неподвижные звезды. Это была первая гелиоцентрическая система мира.

Для подсчета количества песчинок Архимед должен был хотя бы приблизительно определить размеры диаметров Вселенной и песчинки, а затем найти отношение их объемов. Архимед сделал это, опираясь на данные астрономии своего времени и на собственные исследования в этой области. Число песчинок, которое должно было у него при этом получиться, в нашей нумерации записывается так: 10^{63}. Это очень большое число, и до Архимеда не было средств ни для записи, ни для наименования чисел такого порядка.

Чтобы решить поставленную задачу, Архимед поступает следующим образом: все числа, меньшие мириады мириад, т. е. все числа от 1 до 10^8-1, он объединяет в первую октаду (т. е. восьмерицу) и называет их «первыми числами». Число 10^8 служит единицей второй

октады, в которую входят все числа 10^8 до $10^{2\cdot 8}-1$. Это — «вторые числа». Аналогично этому число $10^{2\cdot 8}$ является единицей третьей октады, а числа от $10^{2\cdot 8}$ до $10^{3\cdot 8}-1$ являются «третьими числами». Продолжая это построение, можно дойти до мириадо-мириадной октады, которая содержит числа от $10^{(10^8-1)\cdot 8}$ до $10^{8\cdot 10^8}-1$. Все эти октады Архимед объединяет в первый период. Число $10^{8\cdot 10^8}$ служит единицей первой октады второго периода, и т. д. Этим способом можно дойти до последнего числа последней октады мириадо-мириадного периода. Здесь Архимед останавливается, но ясно, что с помощью его способа можно двигаться и дальше, объединив все периоды в какой-нибудь новый разряд.

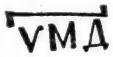
Но и тех чисел, которые построил Архимед, вполне достаточно для подсчета числа песчинок во Вселенной. Необходимое число содержится уже в восьмой октаде первого периода. Архимед продолжил свое построение дальше для того, чтобы разъяснить метод наименования сколь угодно больших чисел.

Способ Архимеда близок к позиционному, но понадобилось еще около тысячи лет, прежде чем человечеству удалось создать десятичную позиционную систему счисления.

Алфавитные системы были, кроме ионийцев, у древних евреев, финикийцев, армян, грузин и других народов. Алфавитная нумерация была принята и в Древней Руси. Над буквами, обозначавшими числа, ставился специальный знак — титло. Это делалось для того, чтобы отличать их от обычных слов.

Удобны ли алфавитные системы?

Запишем в славянской нумерации число 444:



Мы видим, что запись получилась не длиннее нашей. Это объясняется тем, что в алфавитных нумерациях имелось 27 цифр, тогда как в египетской, например, для обозначения всех чисел до 1000 было всего лишь три цифры.

Но алфавитные нумерации имели и крупный недостаток: с их помощью нельзя обозначать сколь угодно большие числа. Они были очень удобны только для записи чисел до 1000.

Правда, славяне, как и греки, умели записывать и бо́льшие числа, но для этого к алфавитной системе они добавляли новые обозначения. Числа 1000, 2000 и т. д. они записывали теми же буквами, что 1, 2 и т. д., только слева внизу ставился специальный знак, например, 1000 обозначали $\overset{\prime}{\text{а}}$.

Аналогично 2= в̃ 2000= $\overset{\prime}{\text{в}}$

3= г̃ 3000= $\overset{\prime}{\text{г}}$

9= ѳ̃ 9000= $\overset{\prime}{\text{ѳ}}$

Число 10 000 опять обозначалось той же буквой, что и 1, только без титла, но его уже обводили кружком: 10 000= (а). Называлось это число «тьмой». Отсюда, между прочим, произошло выражение «тьма народу».

Итак, для обозначения тем первые 9 цифр обводились кружками:

20 000= (в), 30 000= (г), 40000= (д),

50 000= (є), ... , 90 000= (ѳ).

10 тем, или 100 000, было единицей высшего разряда. Ее называли «легион». Для обозначения легионов вокруг первых 9 цифр ставился кружок из точек:

100 000= (а), 200000= (в), 900000= (ѳ).

10 легионов составляли новую единицу, которая называлась леодр. Для обозначения леодров соответствующие числа заключали в кружок из черточек:

1 000 000= (а), 2 000 000= (в), и т. д.

Эти обозначения можно рассматривать как зачатки позиционной системы, так как в ней для обозначения единиц разных разрядов применялись одни и те же символы, к которым добавлялись знаки для определения разряда. Такая система называлась «малым числом». В ней обозначения не шли дальше миллионов.

Но наряду с этим имелось и «большое», или «великое», число, в котором словом тьма обозначался уже 1 000 000. Тьма тем (т. е. 10^{12}) называлась легионом, легион легионов (т. е. 10^{24}) — леодром, леодр леодров (т. е. 10^{48}) — вороном, и, наконец, число 10^{49} называлось колодой. В рукописи XVII в. говорится: «И более сего несть человеческому уму разумевати», т. е. для бо́льших чисел уже нет названий. Для обозначения воронов буквы ставили в кружок из крестиков: (а̃), а колоду обозначали так: $\overset{\prime}{\text{а}}$.

Алфавитные нумерации, как мы говорили, были мало пригодны для оперирования с большими числами, встречавшимися уже в древности (например, при астрономических расчетах). В ходе развития человеческого общества эти системы уступили место позиционным. Но остатки алфавитных нумераций сохранились в нашем обиходе и по сей день. Так, мы часто нумеруем пункты при помощи букв алфавита. Правда, буквы служат только для обозначения последовательного порядка, а не количества. Никаких арифметических операций над такими буквами мы уже не производим.

ПОЗИЦИОННЫЕ СИСТЕМЫ

Первой известной нам позиционной системой счисления была шестидесятеричная система вавилонян, возникшая примерно за 2500—2000 лет до н. э. Основанием ее служило число 60. Следовательно, в ней должно было быть 60 цифр. А таблица умножения должна была состоять из

$$\frac{60 \cdot 60}{2} = 1800 \text{ строк.}$$

Как же вавилоняне записывали свои цифры и как они запоминали такую чудовищную таблицу умножения?

Вавилоняне поступали так: они записывали все числа от 1 до 59 по десятичной системе, применяя принцип сложения. При этом они пользовались всегда двумя знаками: прямым клином ▼ для обозначения 1 и лежачим клином ◄ — для 10. Число 32, например, писали так: ◄◄◄▼▼.

Эти знаки и служили цифрами в их системе. Число 60 снова обозначалось тем же знаком, что и 1, т. е. ▼. Так же обозначалось 3600, 60^3 и все другие степени 60. Например, число 92 записывали так: ▼◄◄◄▼▼.

Таким образом, «цифры», т. е. все числа от 1 до 59, вавилоняне записывали по десятичной непозиционной системе, а число в целом — по позиционной системе с основанием 60. Поэтому-то мы и называем их систему шестидесятеричной (а не шестидесятичной, как нужно было называть, если бы мы учитывали только одно основание 60).

Но нумерация вавилонян имела и еще одну важную особенность: в ней не было знака для нуля. И если был изображен прямой клин ▼, то без дополнительных пояснений нельзя было определить, какое число записано: 1, 60, 3600 или какая-нибудь другая степень 60. Запись числа 92, приведенная выше, могла обозначать не только $92 = 60 + 32$, но и $3600 + 32 = 3632$. Она могла также означать $1\frac{32}{60}$ или $1\frac{32}{3600}$ и т. д.

Таким образом, запись в вавилонской нумерации не носила абсолютного характера — для определения абсолютного значения числа нужны были еще дополнительные сведения. Впоследствии вавилоняне ввели специальный символ для обозначения пропущенного шестидесятичного разряда. Например, число 3632 нужно было бы записать так:

Но в конце числа этот символ никогда не ставился.

Таблицу умножения вавилоняне никогда не запоминали — это было почти невозможно. Они пользовались при своих вычислениях готовыми таблицами умножения, так же как мы теперь пользуемся, например, таблицами логарифмов. При раскопках было найдено множество таких таблиц.

Шестидесятеричная система вивилонян сыграла большую роль в развитии математики и астрономии. Следы ее сохранились до наших дней. Так, мы до сих пор делим час на 60 минут, а минуту на 60 секунд. Точно так же, следуя примеру вавилонян, окружность мы делим на 360 частей (градусов).

Клинописная запись чисел древних вавилонян.

В начале нашей эры индейцы племени майя, которые жили на п-ве Юкатан в Центральной Америке, пользовались другой позиционной системой — с основанием 20. Свои цифры индейцы майя, как и вавилоняне, записывали, пользуясь принципом сложения. Единицу они обозначали точкой, а пять — горизонтальной чертой (см. рисунок) но в этой системе уже был знак для нуля. Он напоминал по своей форме полузакрытый глаз. И, например, число 20 индейцы майя записывали при помощи знака для единицы и внизу знака для нуля (числа писали не в строчку, а столбцами).

Десятичная позиционная система впервые сложилась в Индии не позднее VIII в. н. э. Здесь же впервые был введен нуль.

Итак, позиционные системы счисления возникли независимо одна от другой в Древнем Двуречье, у племени майя и, наконец, в Индии. Все это говорит о том, что возникновение позиционного принципа не было случайностью. Каковы же были предпосылки для его создания? Что привело людей к этому замечательному открытию?

Чтобы ответить на эти вопросы, мы снова обратимся к истории. В Древнем Китае, Индии и в некоторых других странах существовали системы записи, построенные на мультипликативном принципе. Пусть, например, десятки обозначаются символом X, а сотни — С. Тогда запись числа 323 схематично будет выглядеть так:

3С2Х3.

В таких системах для записи одинакового числа единиц, десятков, сотен или тысяч применяются одни и те же символы, но после каждого символа пишется название соответствующего разряда. На аналогичном принципе основаны наши счеты: одно и то же количество косточек означает число десятков, сотен, тысяч и т. д., в зависимости от того, в каком ряду расположены эти косточки.

Но именно такой способ счета применялся при счете «числами-совокупностями». Так, йорубы[1], считая раковины - каури (игравшие у них роль денег), раскладывали их в кучки по 20 раковин в каждой, затем 20 таких кучек они объединяли в одну большую кучу, и т. д. При таком способе счета подчеркивается то обстоятельство, что с кучами можно поступать так же, как и с отдельными раковинами. Н. Н. Миклухо-Маклай рассказывал о способе счета у папуасов, который уже очень близок к построению чисел по принципу умножения. Чтобы сосчитать чи-

Цифры индейцев племени майя.

[1] Одно из африканских племен.

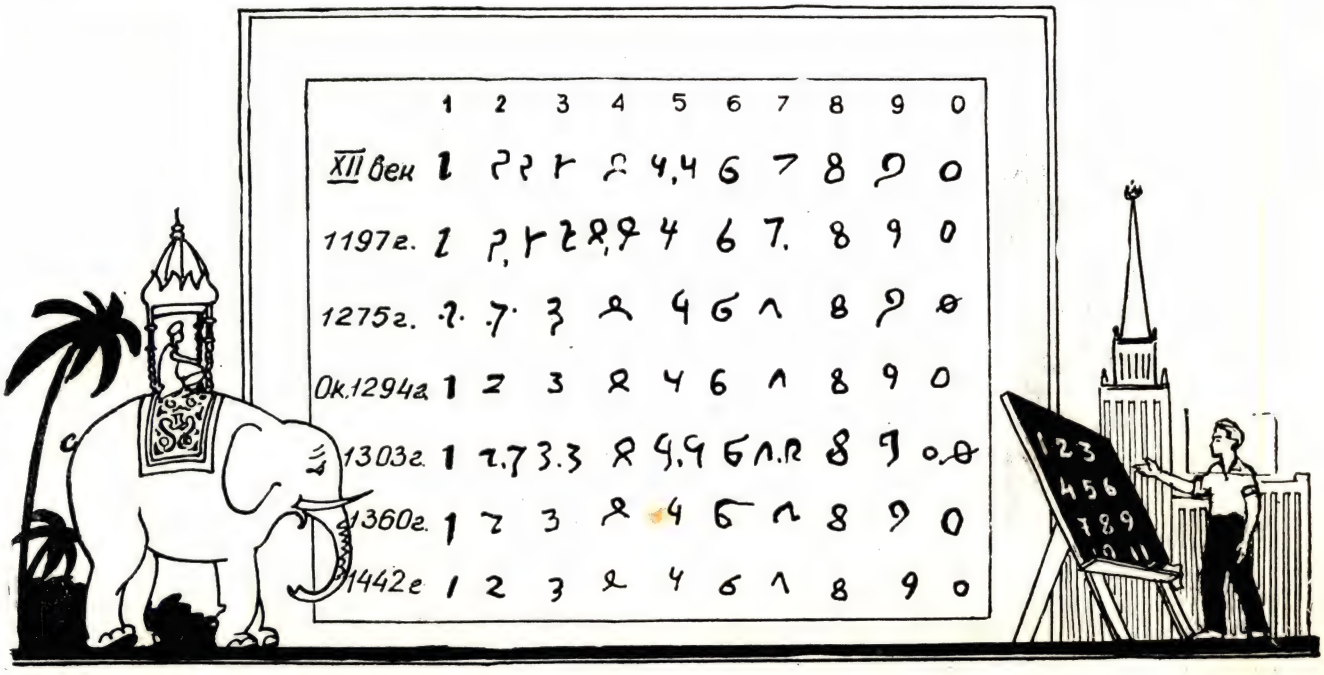
сло дней до возвращения корвета «Витязь», папуасы поступали следующим образом:

«...первый, раскладывая кусочки бумаги на колене, при каждом обрезке повторял «каре-каре» (один), другой повторял слово «каре» и загибал при этом палец прежде на одной, затем на другой руке. Насчитав до десяти и согнув пальцы обеих рук, он опустил оба кулака на колени, повторив «две руки», причем третий папуас загнул один палец руки. Со вторым десятком было сделано то же, причем третий папуас загнул второй палец; то же самое было сделано для третьего десятка».

Рассказывают, что так же считали стада в Южной Африке: один из негров считал каждую голову, второй — число десятков, сосчитанных первым, а третий — число десятков, сосчитанных вторым, т. е. число сотен. Если бы мы теперь обозначили палец первого через I, палец второго посредством X и палец третьего — C, то результат по мультипликативной системе записали бы, например, так: 3C5X3I. В Китае и Индии с древнейших времен существовал именно такой способ записи чисел. Кроме того, индийцы издавна проявляли глубокий интерес к большим числам и способам их записи. В одной из индийских книг — «Лалитавистара» — говорится о состязании между женихами прекрасной Гопы. Предметом состязания были письменность, арифметика, борьба и искусство стрельбы из лука. Почти половина книги посвящена описанию состязаний по арифметике. Победитель Гаутама придумал шкалу чисел, идущих в геометрической прогрессии со знаменателем 100, последним членом которой было $10^{7+9\cdot46}$.

Следующей ступенью к позиционному принципу было опускание названий разрядов при письме (подобно тому, как мы говорим «три двадцать», а не «три рубля двадцать копеек»). Но при записи больших чисел по системе с основанием 10 очень часто бывал необходим символ для обозначения нуля. Введение такого символа увенчало создание современной нумерации. Из Индии она распространилась по всему миру. При этом одни народы переняли у индийцев только принцип обозначения чисел, оставив старые начертания цифр (так было, например, в Китае), другие заимствовали и написание цифр. Мы приводим таблицу, на которой видно, как постепенно видоизменялись цифры «губар», употреблявшиеся в мавританских государствах, пока они не приняли современной формы. Откуда произошли сами цифры «губар», до сих пор остается неясным.

Новая нумерация в странах Европы была принята далеко не сразу. Вплоть до XVIII в. в официальных бумагах разрешалось приме-

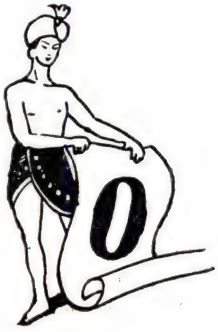


Постепенно видоизменяясь, цифры «губар» (первая строка) приняли форму, близкую к современной.

нять только римские цифры. Однако преимущества позиционного принципа счисления были настолько велики, что еще в XIII в. он стал применяться итальянскими купцами. Леонардо Пизанский — замечательный ученый XIII в.— тогда же выступил убежденным сторонником новой системы. В Германии, Франции и Англии до конца XV в. новая нумерация почти не употреблялась. Но к концу XVI—началу XVII в. позиционная система одержала решительную победу — ее приняли не только купцы, но и все ученые. Ее стали применять повсеместно.

В России, как мы уже знаем, в старину употреблялась алфавитная система, которая имеет много преимуществ по сравнению с римской. Но и здесь новая нумерация быстро вошла в употребление: во всех без исключения математических рукописях XVII в. применялась десятичная позиционная система счисления. При Петре I индийские цифры уже вытесняют на монетах славянские, а в послепетровские времена славянские цифры вообще быстро исчезают из обихода.

Приведем в заключение слова знаменитого французского математика и физика XVIII—XIX вв. Лапласа: «Мысль выражать все числа девятью знаками, придавая им, кроме значения по форме, еще значение по месту, настолько проста, что именно из-за этой простоты трудно понять, насколько она удивительна. Как нелегко было прийти к этому методу, мы видим на примере величайших гениев греческой учености Архимеда и Аполлония, от которых эта мысль осталась скрытой».



ПРОСТЕЙШИЕ НЕОПРЕДЕЛЕННЫЕ УРАВНЕНИЯ

ПИФАГОРОВЫ ТРЕУГОЛЬНИКИ

Футбольное поле — это прямоугольная площадка длиной 90 *м* и шириной 60 *м*. Как разметить такую площадку? Прямоугольник на листе бумаги строят при помощи линейки и циркуля или линейки и угольника. Эти приборы слишком малы для работы на местности. Они не обеспечат нужной точности в построении прямых углов такой площадки, как футбольное поле. Если же сделать линейку, циркуль и угольник достаточно больших размеров, то ими будет невозможно пользоваться.

Для построения прямоугольной площадки следовало бы взять угольник и циркуль таких размеров.

С давних времен известен очень простой способ построения на местности прямых углов. Выполним такое построение. Возьмем шнур и три колышка. На шнуре отметим 12 равных долей. Затем узлами выделим три части шнура MB, BC и CN так, чтобы первая часть состояла из пяти, вторая из четырех и последняя из трех таких долей. Узлы M и N свяжем вместе и обозначим вновь полученный узел через A.

С помощью колышков натянем часть шнура BC вдоль данной прямой так, чтобы точка C совпала с точкой, через которую должен быть проведен перпендикуляр к данной прямой. Потом оттянем шнур за узел A так, чтобы участки AB и AC стали прямолинейными, и вобьем в точке, где будет находиться узел A, колышек. Задача построения на местности прямого угла решена, так как угол ACB прямой.

Построение прямого угла на местности.

Чтобы убедиться в этом, докажем, что прямоугольным будет всякий треугольник, стороны которого, измеренные какой-нибудь линейной единицей измерения, выражаются числами 3, 4 и 5. Для

доказательства возьмем прямоугольный треугольник с катетами, равными двум меньшим сторонам данного треугольника, и найдем его гипотенузу x. По теореме Пифагора $x^2=3^2+4^2$. Поэтому $x=5$. Таким образом, три стороны данного треугольника соответственно равны трем сторонам прямоугольного треугольника. А отсюда следует, что и данный треугольник — прямоугольный.

Доказанное свойство треугольника со сторонами 3, 4 и 5 было, по-видимому, известно еще древнеегипетским землемерам. Поэтому такой треугольник и называют египетским. Всякий целочисленный треугольник[1], подобный египетскому, также является прямоугольным. Существуют ли другие целочисленные прямоугольные треугольники? Если катеты и гипотенузу какого-нибудь целочисленного прямоугольного треугольника обозначить буквами x, y и z, то по теореме Пифагора получим:

$$x^2+y^2=z^2. \qquad (1)$$

Оказывается, что верно и обратное, т. е. если x, y и z — натуральные числа, удовлетворяющие уравнению (1), то треугольник со сторонами x, y и z — прямоугольный. Целочисленный прямоугольный треугольник для краткости иногда называют пифагоровым.

Наше рассуждение показывает, что задача отыскания всех пифагоровых треугольников сводится к решению уравнения (1) в натуральных числах. Но решением этого уравнения мы займемся немного позднее, а сейчас рассмотрим несколько других задач.

ПОКУПКА БИЛЕТА В МЕТРО

На каждом автомате по продаже билетов в метро имеется следующая надпись:

«Опустите 50 коп. монетами:

10+20+20
10+10+15+15
10+10+10+20
15+15+20
10+10+10+10+10».

Все ли возможные способы уплатить 50 коп. монетами достоинством в 10, 15 и 20 коп. предусмотрели конструкторы автомата?

Предположим, что несколько монет достоинством в 20, 15 и 10 коп. составляют сумму в 50 коп. При этом условимся считать число монет какого-либо достоинства равным нулю, если монеты данного достоинства не входят в сумму. Обозначая через x, y и z соответственно число монет в 20, 15 и 10 коп., входящих в эту сумму, получим уравнение:

$$20x+15y+10z=50. \qquad (2)$$

Сколько монет следует опустить в автомат, чтобы купить билет?

Таким образом, каждому способу уплатить 50 коп. монетами достоинством в 20, 15 и 10 коп. соответствует одно решение уравнения (2) в неотрицательных целых числах. Легко видеть, что верно и обратное. Каждому решению x, y, z уравнения (2) в неотрицательных целых числах соответствует определенный способ уплаты 50 коп. монетами достоинством в 20, 15 и 10 коп. Поэтому задача отыскания всех таких способов покупки билета в метро сводится к нахождению всех решений уравнения (2) в неотрицательных целых числах.

ВЗВЕШИВАНИЕ ГРУЗА НА ЧАШЕЧНЫХ ВЕСАХ

Можно ли 28 *Г* некоторого вещества отвесить на чашечных весах, имея гири весом только в 3 и 5 *Г*?

Оказывается, это можно сделать даже несколькими способами.

Попытаемся найти все способы взвешивания. Для этого поместим груз в 28 *Г* на правую чашку весов и уравновесим его гирями весом в 3 и 5 *Г*. Возможны такие случаи: а) все гири находятся на левой чашке весов; б) гири по 3 *Г* находятся на левой чашке весов, а гири по 5 *Г* вместе с грузом находятся на правой чашке весов; в) гири по 5 *Г* находятся на левой чашке весов, а гири по 3 *Г* вместе с грузом находятся на правой чашке весов.

Если через x обозначить число использованных гирь весом в 3 *Г*, а через y — число использованных гирь весом в 5 *Г*, то в

[1] Целочисленным треугольником называют треугольник, длины сторон которого выражаются целыми числами.

Сколько нужно взять гирь?

соответствии с вышеприведенными случаями получим:

$$\text{а) } 3x+5y=28;$$
$$\text{б) } 3x=28+5y \quad \text{или } 3x-5y=28;$$
$$\text{в) } 5y=28+3x \quad \text{или } 5y-3x=28. \qquad (3)$$

Чтобы найти все способы взвешивания, нужно решить каждое из полученных уравнений в неотрицательных целых числах, или, что то же самое, решить уравнение (3) в целых числах. Нужно при этом иметь в виду, что значения неизвестных x и y указывают не только на число использованных гирь, но и на их место на чашках весов. Так, если значение неизвестного x положительно, то число гирь весом в 3 *Г* равно x, и все они находятся на левой чашке весов; если значение неизвестного x отрицательно, то число гирь весом в 3 *Г* равно x, и все они находятся на правой чашке весов.

НЕОПРЕДЕЛЕННЫЕ УРАВНЕНИЯ

Каждая из рассмотренных задач сводится, как мы убедились, к решению в целых числах некоторого уравнения, содержащего более одного неизвестного. Такие уравнения называют неопределенными. При решении неопределенных уравнений обычно ищут значения неизвестных, удовлетворяющие тем или иным арифметическим условиям. Например, их решают в целых или в рациональных числах.

Еще александрийский математик Диофант (III в. н. э.) занимался решением алгебраических неопределенных уравнений в рациональных числах. Решением неопределенных уравнений в целых числах впервые начали заниматься ученые Индии. Они предложили общий метод для решения в целых числах неопределенных уравнений первой степени с целыми коэффициентами, а также нашли решение в целых числах некоторых неопределенных уравнений второй степени с двумя неизвестными.

РАЦИОНАЛЬНЫЕ И ЦЕЛЫЕ РЕШЕНИЯ НЕОПРЕДЕЛЕННЫХ УРАВНЕНИЙ ПЕРВОЙ СТЕПЕНИ. МЕТОД РАССЕИВАНИЯ

Решить неопределенное уравнение первой степени с целыми коэффициентами в рациональных числах нетрудно. Возьмем, например, уравнение

$$29x-13y=17. \qquad (4)$$

Чтобы найти все решения этого уравнения, узнаем, при каких рациональных значениях одного неизвестного соответствующее значение второго неизвестного рационально. Каждому значению неизвестного x соответствует единственное значение неизвестного y, определяемое из формулы:

$$y=\frac{29x-17}{13}. \qquad (5)$$

Если значение неизвестного x рационально, то и значение неизвестного y, получаемое из формулы (5), рационально.

Для отыскания целых решений уравнения (4) мы не можем непосредственно воспользоваться формулой (5), так как при целых значениях одного неизвестного второе неизвестное не обязательно принимает целые значения. Чтобы найти все целые решения уравнения (4), будем искать такие значения неизвестного x, для которых соответствующее значение неизвестного y является целым числом. Это незначительное на первый взгляд изменение постановки задачи открывает путь для ее решения.

Замечая, что $\frac{29}{13}=2+\frac{3}{13}$, а $\frac{17}{13}=1+\frac{4}{13}$, мы, пользуясь формулой (5), получим:

$$y=2x-1+\frac{3x-4}{13}. \qquad (6)$$

Мы должны узнать, при каких целых значениях неизвестного x неизвестное y принимает целые значения. Так как при целом x число $2x-1$ является целым, то из формулы (6) следует, что неизвестное y при целом x только в том случае принимает целое значение, если выражение $\frac{3x-4}{13}$ есть целое число. Наша задача еще не решена, но мы приблизились к цели.

В самом деле, полагая

$$\frac{3x-4}{13}=y_1,$$

мы замечаем, что вопрос, при каких целых значениях неизвестного x неизвестное y_1 прини-

Будем решать задачу методом рассеивания.

мает целые значения, равносилен вопросу о целых решениях уравнения

$$3x - 13y_1 = 4. \qquad (7)$$

Таким образом, решение в целых числах уравнения (4) нам удалось свести к решению в целых числах уравнения (7). Чем же второе уравнение предпочтительнее первого?

Самым простым из неопределенных уравнений естественно считать такое, у которого хотя бы один из коэффициентов при неизвестных равен 1 или —1. В этом случае неизвестное с таким коэффициентом при любых целых значениях остальных неизвестных принимает целые значения. Поэтому чем м е н ь ш е наименьшая из абсолютных величин коэффициентов при неизвестных, тем уравнение предпочтительнее. В уравнении (4) наименьшая из абсолютных величин коэффициентов при неизвестных равна 13, а в уравнении (7) эта величина равна 3. Как удалось достичь этого? Коэффициент при неизвестном x и свободный член уравнения были заменены остатком от деления этих чисел на 13. Но остаток от деления целого числа на натуральное число всегда меньше этого натурального числа. Понятно теперь, почему с самого начала неизвестное y было выражено через неизвестное x: мы выбрали неизвестное с наименьшим по абсолютной величине коэффициентом. Мы приобрели некоторый опыт и можем теперь смело приняться за уравнение (7).

При каких целых значениях неизвестного y_1 неизвестное x принимает целые значения? Из равенства

$$x = \frac{4 + 13y_1}{3} = 1 + 4y_1 + \frac{1 + y_1}{3}. \qquad (8)$$

находим, что неизвестное x при целых значениях неизвестного y_1 только в том случае принимает целые значения, если $\frac{1 + y_1}{3}$ есть целое число. Обозначая через x_1 это выражение, получим: $1 + y_1 = 3x_1$, или

$$3x_1 - y_1 = 1. \qquad (9)$$

Таким образом, задача сведена к решению в целых числах уравнения (9). Но решить в целых числах уравнение (9) — значит узнать, при каких целых значениях неизвестного x_1 неизвестное y_1 также принимает целые значения. Но $y_1 = 3x_1 - 1$, поэтому y_1 принимает целые значения при любых целых значениях неизвестного x_1. Теперь из равенств (8) и (6) последовательно найдем выражения для неизвестных x и y:

$$x = 1 + 4(3x_1 - 1) + x_1 = 13x_1 - 3;$$
$$y = 2 \cdot (13x_1 - 3) - 1 + 3x_1 - 1 = 29x_1 - 8.$$

Из приведенных рассуждений следует, что

$$x = 13x_1 - 3,$$
$$y = 29x_1 - 8$$

при $x_1 = 0, \pm 1, \pm 2, \pm 3, \ldots$ дают все целые решения уравнения (4).

Точно так же можно поступить и в том случае, когда число неизвестных в неопределенном уравнении первой степени больше двух. Для этого нужно выбрать неизвестное с наименьшим (по абсолютной величине) коэффициентом и поставить вопрос, при каких целых значениях других неизвестных выбранное неизвестное принимает целые значения. Легко догадаться, как поступать дальше. Описанный метод решения неопределенных уравнений в целых числах несущественно отличается от метода, предложенного индийцами. В связи с тем, что при решении неопределенного уравнения по этому методу оно сводится к цепочке уравнений с уменьшающимися коэффициентами, индийские математики назвали этот метод м е т о д о м р а с с е и в а н и я.

РЕШЕНИЕ ЗАДАЧИ О ВЗВЕШИВАНИИ

Итак, нам нужно решить в целых числах уравнение (3). Определяем неизвестное x:

$$x = \frac{28 - 5y}{3} = 9 - y + \frac{1 - 2y}{3}.$$

Верно и такое равенство:

$$x = 9 - 2y + \frac{1 + y}{3}.$$

Им-то мы и воспользуемся. Ведь наша цель состоит в том, чтобы уменьшить коэффициент при y. Введем обозначение:

$$x_1 = \frac{1 + y}{3}.$$

Задача о взвешивании решена!

Задача сведена к решению в целых числах уравнения

$$3x_1 - y = 1.$$

Решая это уравнение, получим:

$$y = 3x_1 - 1,$$

где x_1 — любое целое число. А тогда

$$x = 9 - 2\cdot(3x_1 - 1) + x_1 = 11 - 5x_1.$$

Таким образом, общее решение уравнения (3) можно записать так:

$$x = 11 - 5x_1,$$
$$y = 3x_1 - 1,$$

где $x_1 = 0,\ \pm 1,\ \pm 2, \ldots$

Найдем несколько решений этого уравнения, соответствующих следующим значениям неизвестного $x_1 = 0,\ 1, -1,\ 2, -2,\ 3, -3$:

x_1	0	1	—1	2	—2	3	—3
x	11	6	16	1	21	—4	26
y	—1	2	—4	5	—7	8	—10

Уравнение (3) имеет бесконечное множество решений, но сможем мы воспользоваться только некоторыми. Это зависит от числа гирь, имеющихся в нашем распоряжении, да и от размеров чашек.

РЕШЕНИЕ ЗАДАЧИ О ПОКУПКЕ БИЛЕТА В МЕТРО

Решим уравнение (2) в неотрицательных целых числах. Сначала найдем все целые решения этого уравнения. Разделив обе части уравнения на 5, получим:

$$4x + 3y + 2z = 10.$$

Из этого равенства находим:

$$z = \frac{10 - 4x - 3y}{2} = 5 - 2x - y - \frac{y}{2}.$$

Отсюда следует, что неизвестное z при целых значениях неизвестных x и y тоже принимает целые значения только тогда, когда число $\frac{y}{2}$ целое, т. е. если число y четно. Полагая $y = 2a$, получим:

$$z = 5 - 2x - 3a.$$

Мы найдем все целые решения уравнения (2), давая параметрам x и a в формулах

$$\begin{aligned} x &= x, \\ y &= 2a, \\ z &= 5 - 2x - 3a \end{aligned} \qquad (10)$$

все возможные целые значения. Нас интересуют только неотрицательные решения уравнения (2), поэтому мы должны найти такие целые значения параметров x и a, при которых неизвестные x, y и z, определяемые из формул (10), принимают неотрицательные значения. Для этого нужно решить в целых числах систему неравенств:

$$x \geqslant 0,\ 2a \geqslant 0,\ 5 - 2x - 3a \geqslant 0$$

или

$$a \geqslant 0,\ 0 \leqslant x \leqslant \frac{5 - 3a}{2}.$$

Нетрудно понять, что a может принимать два значения: 0 и 1. Если $a = 0$, то x примет одно из трех значений: 0, 1 или 2. Если же $a = 1$, то x может принимать лишь значения 0 или 1.

Таким образом, уравнение (2) имеет только 5 решений в неотрицательных целых числах.

Иными словами уплатить за билет в метро 50 коп. монетами достоинством в 10, 15 и 20 коп. можно только пятью вышеприведенными способами.

Мы рассмотрели несколько уравнений первой степени. Каждое из них, как нам удалось установить, имеет целочисленные решения. Однако наряду с ними можно указать уравнения, которые решений

Билет куплен.

в целых числах не имеют. Таково, например, уравнение

$$3x-6y=5. \qquad (11)$$

В самом деле, допустив, что при некоторых целых x и y равенство (11) верно, мы получим, что 5 делится на 3.

Какие неопределенные уравнения разрешимы в целых числах?

В чем состоит условие разрешимости таких уравнений?

Если некоторое неопределенное уравнение первой степени имеет решения в целых числах, то всегда ли можно найти эти решения методом рассеивания?

Ответ на первый вопрос дает следующая теорема:

Уравнение с целыми коэффициентами

$$a_1x_1+a_2x_2+\ \dots\ +a_nx_n=b \qquad (12)$$

разрешимо в целых числах только в том случае, если свободный член b делится на наибольший общий делитель чисел a_1, a_2, ..., a_n. Здесь a_1, a_2, ..., a_n, b — целые числа.

В целях экономии места мы не приводим доказательства этой теоремы, хотя оно и элементарно.

Ответим на другой вопрос: всегда ли предложенный метод решения уравнения первой степени в целых числах приводит к успеху?

Идея метода состоит в замене данного уравнения равносильным ему уравнением, у которого абсолютная величина коэффициентов меньше абсолютных величин коэффициентов заданного уравнения.

Если a_1 — наименьший по абсолютной величине коэффициент при неизвестных уравнения (12), то мы заменяем это уравнение другим, в котором все коэффициенты, кроме коэффициента при неизвестном x_1, заменены остатками от деления этих коэффициентов на a_1. Если хотя бы один из коэффициентов a_2, a_3, ..., a_n не делится целиком на a_1, то мы получим уравнение с меньшими (в указанном смысле) коэффициентами. С этим уравнением поступаем так же, как с данным. Если же все числа a_2, a_3, ..., a_n делятся на a_1, то и b делится на a_1 (в случае разрешимости в целых числах данного уравнения). Деля в этом

случае обе части уравнения на a_1, мы получим уравнение, целые решения которого находятся без труда.

Описанный метод в случае разрешимости уравнения в целых числах всегда позволяет найти целые решения этого уравнения.

НЕОПРЕДЕЛЕННЫЕ СИСТЕМЫ УРАВНЕНИЙ ПЕРВОЙ СТЕПЕНИ

При решении в целых числах неопределенных систем уравнений первой степени с целыми коэффициентами, т. е. таких систем уравнений, у которых число неизвестных больше числа уравнений, обычно пользуются методом последовательного исключения неизвестных.

Решим, например, в целых числах такую систему уравнений:

$$3x+5y-7z=15,$$
$$2x+3y-9z=12.$$

Сначала возьмем первое уравнение и найдем, при каких целых значениях неизвестных y и z неизвестное x принимает целые значения. Получаем:

$$x=\frac{15-5y+7z}{3}=5-2y+2z+\frac{y+z}{3}.$$

Полагаем, что

$$\frac{y+z}{3}=x_1.$$

Отсюда следует, что

$$z=3x_1-y$$

и

$$x=5-2y+2(3x_1-y)+x_1=5-4y+7x_1.$$

Найденные значения неизвестных x и z подставляем во второе уравнение:

$$2(5-4y+7x_1)+3y-9(3x_1-y)=12.$$

После приведения подобных членов получим следующее уравнение:

$$4y-13x_1=2.$$

Решим его в целых числах:

$$y=\frac{2+13x_1}{4}=3x_1+\frac{2+x_1}{4},$$

$$y_1=\frac{2+x_1}{4},$$

$$x_1=4y_1-2 \quad \text{и} \quad y=3(4y_1-2)+y_1=13y_1-6.$$

Таким образом, все целые решения данной системы уравнений можно получить из формул:

$$x = 5 - 4(13y_1 - 6) + 7(4y_1 - 2) = 15 - 24y_1;$$
$$y = 13y_1 - 6;$$
$$z = 3(4y_1 - 2) - 13y_1 + 6 = -y_1,$$

где y_1 — целое число.

К системам неопределенных уравнений первой степени сводятся, например, задачи по отысканию чисел, дающих при делении на данные целые числа заданные остатки.

РАЦИОНАЛЬНЫЕ РЕШЕНИЯ НЕОПРЕДЕЛЕННЫХ УРАВНЕНИЙ СТЕПЕНИ ВЫШЕ ПЕРВОЙ

Решение таких уравнений — задача несравненно более трудная, чем решение в рациональных числах неопределенных уравнений первой степени. Познакомимся с решением в рациональных числах уравнения

$$x^2 + y^2 = 1. \qquad (13)$$

Тот же метод может быть применен к решению в рациональных числах уравнений вида

$$ax^2 + y^2 = 1,$$

где a — любое данное рациональное число, а также к решению некоторых других уравнений. Метод этот подсказан Диофантом [1].

Если (x, y) есть рациональное решение уравнения (13), то $(-x, y)$, $(-x, -y)$ и $(x, -y)$ — решения того же уравнения. Из этой четверки решений по меньшей мере одно является решением данного уравнения в неотрицательных рациональных числах. Уравнение (13) имеет решения (0, 1), (0, —1), (1, 0) и (—1, 0), а у всех остальных решений этого уравнения значения обоих неизвестных не равны нулю. Из сказанного следует, что, найдя все решения уравнения (13) в положительных рациональных числах, мы сможем немедленно указать и все рациональные решения того же уравнения. Чтобы найти все решения уравнения (13) в положительных рациональных числах, узнаем, для каких положительных и рациональных значений неизвестного x число $\sqrt{1-x^2}$ [2] рационально.

Это число представим в таком виде:

$$\sqrt{1-x^2} = 1 - tx, \qquad (14)$$

где t — некоторое рациональное число. Тогда вопрос о рациональных значениях неизвестного x, для которых число $\sqrt{1-x^2}$ рационально, сводится к вопросу о том, для каких значений x справедливо равенство (14). Для того чтобы ответить на этот вопрос, решим следующее уравнение:

$$1 - x^2 = (1 - tx)^2,$$
$$1 - x^2 = 1 - 2tx + t^2x^2,$$
$$(1 + t^2)\,x = 2t,$$
$$x = \frac{2t}{1+t^2}.$$

Эти выкладки можно провести и в обратном порядке. Таким образом, равенство (14) возможно только в том случае, если $x = \frac{2t}{1+t^2}$. Из этого равенства следует, что для рациональных t рационально и x. Поэтому число $\sqrt{1-x^2}$ рационально для рациональных значений неизвестного x, если $x = \frac{2t}{1+t^2}$, где t — рациональное число. Но

$$1 - tx = \frac{1-t^2}{1+t^2},$$

поэтому всякое решение уравнения (13) можно получить, пользуясь формулами:

$$x = \frac{2t}{1+t^2} \quad \text{и} \quad y = \frac{1-t^2}{1+t^2}.$$

Нетрудно понять, что все решения уравнения (13) в положительных рациональных числах мы получим, если заставим параметр t принимать все положительные рациональные значения между 0 и 1.

Особенно трудным оказалось решение в рациональных числах уравнений выше второй степени. До сих пор, например, не найдено элементарное доказательство теоремы о том, что уравнение $x^3 + y^3 = 1$ не имеет решений в положительных рациональных числах.

[1] Интересно отметить, что идея этого метода используется при вычислении некоторых интегралов (см. статью «Интеграл и производная»).

[2] Символом $\sqrt{}$ мы обозначаем арифметический корень.

ЦЕЛЫЕ РЕШЕНИЯ НЕОПРЕДЕЛЕННЫХ УРАВНЕНИЙ СТЕПЕНИ ВЫШЕ ПЕРВОЙ

Решение в целых числах неопределенных уравнений степени выше первой с целыми коэффициентами — во многих случаях задача значительно более сложная, чем решение таких же уравнений в рациональных числах.

Индийские математики (V—XII вв.) нашли решение в целых числах некоторых уравнений второй степени с двумя неизвестными. Полностью задачу решения в целых числах неопределенных уравнений второй степени с двумя неизвестными решил французский математик Лагранж (1736—1813).

Уравнения третьей степени с двумя неизвестными до сих пор до конца не исследованы. С некоторыми типами таких уравнений удалось справиться советскому математику Б. Н. Делоне. Нужно сказать, что даже установить число решений таких уравнений третьей и более высоких степеней исключительно трудно.

В начале нашего столетия норвежскому математику Акселю Туэ удалось доказать интересную теорему: *Неопределенное уравнение с целыми коэффициентами*

$$a_0x^n + a_1x^{n-1}y + a_2x^{n-2}y^2 + \ldots + a_ny^n = b,$$

где n — целое число, большее двух, имеет только конечное множество решений (как частный случай — не имеет решения) в целых числах, за исключением случаев, когда левая часть этого уравнения есть степень однородного двучлена первой степени или трехчлена второй степени.

Еще более трудным является вопрос о решении в целых числах неопределенных уравнений выше первой степени с более чем двумя неизвестными. До сих пор неизвестен общий метод решения таких уравнений. Уравнение (1) является простейшим из таких уравнений. Если a, b, c — решение этого уравнения в натуральных и взаимно простых числах, то $\frac{a}{c}$, $\frac{b}{c}$ есть решение уравнения (13) в положительных рациональных числах. Поэтому $\frac{a}{c} = \frac{2t}{1+t^2}$ и $\frac{b}{c} = \frac{1-t^2}{1+t^2}$, где t — некоторое рациональное число, удовлетворяющее условию $0<t<1$. Сделаем замену, полагая $t=\frac{n}{m}$, где n и m — целые числа. Эти числа мы можем считать взаимно простыми и даже натуральными, подчиненными условию $n<m$, так как $0<t<1$. Поэтому

$$\frac{a}{c} = \frac{2mn}{m^2+n^2} \text{ и } \frac{b}{c} = \frac{m^2-n^2}{m^2+n^2}.$$

В левой части первого равенства стоит несократимая дробь, так как если числа a и c имеют общий простой делитель, то и число b делится на этот делитель. В правой части этого равенства стоит либо несократимая дробь, либо дробь, числитель и знаменатель которой делится на 2, но не делится на большее число. В самом деле, в противном случае какое-нибудь простое число p делит хотя бы одно из целых чисел m или n и знаменатель этой дроби, т. е. m^2+n^2. А тогда и другое делится на p. Таким образом, числа m и n имеют общий делитель p. А это противоречит условию о том, что числа m и n взаимно простые. Заметим далее, что число 2 тогда только может быть общим делителем числителя и знаменателя первой дроби, когда m и n — нечетные числа. Если две несократимые дроби с натуральными числами в роли числителя и знаменателя равны, то числители и знаменатели этих дробей также равны. Поэтому $a=2mn$, $c=m^2+n^2$ в первом случае и $a=mn$, $c=\frac{1}{2}(m^2+n^2)$ во втором случае. Из второго равенства соответственно получим: $b=m^2-n^2$ и $b=\frac{1}{2}(m^2-n^2)$. Таким образом, в первом случае решение уравнения (1) можно записать в виде

$$a=2mn,\ b=m^2-n^2,\ c=m^2+n^2,$$

где натуральные числа m и n взаимно простые и удовлетворяют условию $n<m$.

Во втором случае решение уравнения (1) можно записать в виде

$$a=mn,\ b=\frac{1}{2}(m^2-n^2),\ c=\frac{1}{2}(m^2+n^2),$$

где m и n — нечетные взаимно простые натуральные числа, причем $n<m$.

Так как в этих формулах из чисел a и b одно четное, а другое нечетное, а неизвестные x и y в уравнении (1) равноправны, то при отыскании тех решений уравнения (1), у ко-

торых значение неизвестного x четное, мы можем пользоваться формулами

$$x = 2mn, \quad y = m^2 - n^2, \quad z = m^2 + n^2, \qquad (15)$$

где m и n—взаимно простые натуральные числа разной четности и $n<m$. В самом деле, не только любое решение уравнения (1) в натуральных и взаимно простых числах может быть получено из формул (15), но и при любых значениях n и m, удовлетворяющих указанным условиям, мы будем получать такие решения.

Пользуясь формулами (15), найдем несколько решений уравнения (1), давая параметрам m и n небольшие значения:

m	2	3	4	4	5	5
n	1	2	1	3	2	4
$x=2mn$	4	12	8	24	20	40
$y=m^2-n^2$	3	5	15	7	21	9
$z=m^2+n^2$	5	13	17	25	29	41

Занимаясь неопределенными уравнениями, известный французский математик Пьер Ферма (1601—1665) высказал предположение, что для любого натурального числа n, большего 2, уравнение

$$x^n + y^n = z^n$$

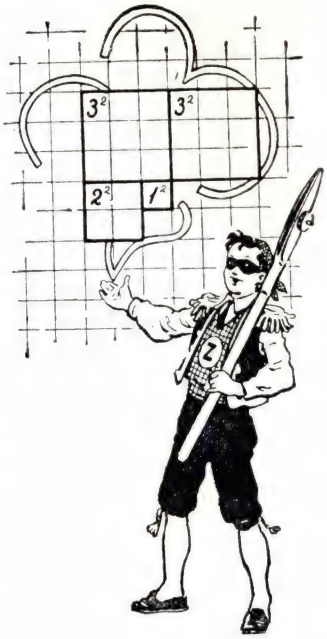
не имеет решений в натуральных числах. Доказательство этого утверждения для $n=3$ и $n=4$ было найдено Л. Эйлером. В дальнейшем предпринимались многочисленные попытки доказать это утверждение полностью, но они не имели успеха[1]. Однако такие попытки не были бесплодными — они содействовали возникновению и развитию нового отдела математики — алгебраической теории чисел.

В 1770 г. шотландский математик Варинг высказал предположение, что для всякого натурального k, не равного 1, существует такое натуральное число r, что при любом натуральном N уравнение

$$x_1^k + x_2^k + \ldots + x_r^k = N \qquad (16)$$

разрешимо в целых неотрицательных числах. Доказательство частного случая этого утверждения принадлежит Лагранжу. Он установил, что всякое целое число можно представить в виде суммы четырех квадратов целых неотрицательных чисел. Например,

$$23 = 3^2 + 3^2 + 2^2 + 1^2,$$
$$26 = 4^2 + 3^2 + 1^2 + 0^2.$$



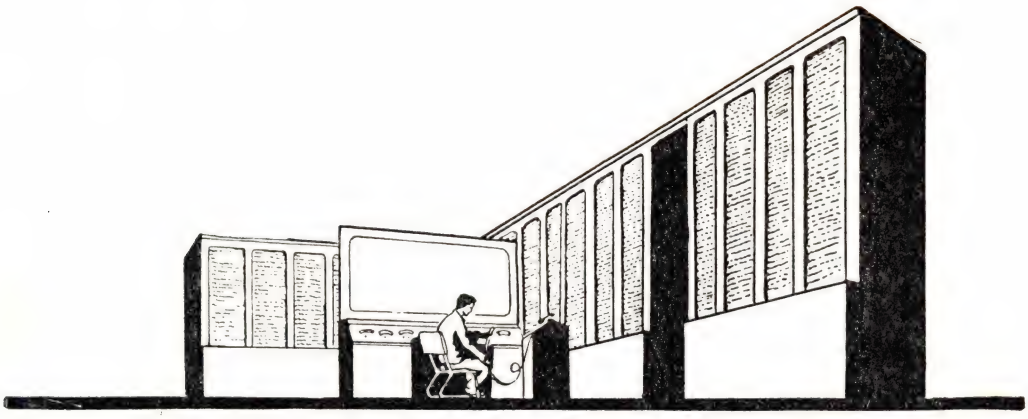
Полностью эту теорему удалось доказать в 1909 г. немецкому математику Гильберту. Но ему не удалось сделать оценку числа r, т. е. указать, как мало может быть это число. Точное значение наименьшего r, для которого при любом N уравнение (16) разрешимо в целых неотрицательных числах, стало возможным определить только после создания советским математиком И. М. Виноградовым особого метода для решения этой и сходных с ней задач.

Совсем недавно стали изучаться показательные неопределенные уравнения. К этой области принадлежит интересная теорема советского математика А. О. Гельфонда:

Уравнение $a^x + b^y = c^z$, где a, b и c — целые, каждое из которых не равно 0 и степени двойки, может иметь не более чем конечное число решений в целых числах x, y и z.

Наиболее трудными являются неопределенные уравнения, связанные каким-либо образом с простыми числами. Но и в этой области за последние годы наметился успех. Мы не будем останавливаться здесь на сложной и увлекательной проблеме простых чисел. Подробнее о ней можно узнать из книг, указанных в библиографическом справочнике по математике (стр. 221—224).

[1] В 1955 г., применив быстродействующие вычислительные машины, ученые США установили справедливость предположения Ферма для всех $n<4003$.



Культура счета и приближенные вычисления

ХОРОШО ЛИ ВЫ СЧИТАЕТЕ?

(приемы культурного счета в арифметике и в алгебре)

Считать приходится везде: считают в трамвае и магазине, дома и на производстве, в бухгалтерии учреждения и в банке. Сложными вычислениями сопровождается работа конструктора, проектирующего машину, и ученого, определяющего элементы движения искусственного спутника Земли.

Попутно с совершенствованием методов научного исследования вычислительная математика все больше и все глубже охватывает все стороны многообразной деятельности человека. Именно вычислениями астроном, инженер, ученый проверяет в большинстве случаев свое научное предвидение, подтверждает или отвергает созданные им гипотезы. Сейчас, как и много лет назад, с той же убедительностью звучат мудрые слова Лейбница: «Не будем спорить, а будем вычислять».

Люди всегда искали и изобретательно находили различные вспомогательные средства, облегчающие вычислительную работу. От известных всем русских счетов, от специальных печатных таблиц, которыми широко пользуются и в школе, от арифмометра и логарифмической линейки к современным электронным вычислительным машинам — вот тот путь, который прошла вычислительная техника за сравнительно короткое время. В нашей стране созданы и вновь создаются «вычислительные центры»— фабрики механизированного счета, оснащенные чудесными «умными» машинами, заменяющими труд многих сотен математиков-вычислителей.

Счеты — самое распространенное вычислительное приспособление.

Может возникнуть мысль, что с появлением механических средств счета исчезает необходимость в обыкновенном, простом счете и, в частности, в устном счете. Думать так было бы глубоким заблуждением: помощь различных вспомогательных средств не может покрыть все и всякие потребности в счете, встречающиеся в быту и в повседневной работе. Так же, как самый современный универсальный станок не освобождает рабочего от необходимости взяться иногда за молоток и зубило, так и счетный прибор или таблица не освобождают вычислителя от самого обычного, простого счета. Больше того: очень часто наиболее удобная и надежная вычислительная работа заключается в умелом сочетании вычислений на приборе со вспомогательным подсчетом «в уме».

Овладение навыками устного счета требует прежде всего преодоления часто наблюдаемой своеобразной робости перед устными вычислениями и преобразованиями и постоянного накопления опыта работы «в уме». Опыт и «вкус» к устной работе — залог успеха: именно они воспитывают ту сосредоточенность внимания, наблюдательность, настойчивость и находчивость, без которых немыслима успешная работа «в уме». Немалую пользу может принести также и знание общих принципов и некоторых специальных приемов устного счета.

КОГДА НЕ СЛЕДУЕТ ПОЛЬЗОВАТЬСЯ ШАБЛОННЫМИ ПРИЕМАМИ ВЫЧИСЛЕНИЙ

Говоря об устном или полуустном счете, мы имеем в виду совсем не только вычисления, сводящиеся к выполнению арифметических действий над несколькими данными числами. Область применения устного счета значительно шире: она охватывает и выполняемые «в уме» различные преобразования, относимые обычно к алгебре. Нередко сложное числовое выражение, в котором, кажется, не обойтись без громоздких письменных вычислений, на самом деле быстро и легко вычисляется «в уме», если только находчиво использовать некоторые формулы и преобразования.

Как проще извлечь корень?

Поясним сказанное несколькими примерами.

Пример 1. Найти катет прямоугольного треугольника, если другой катет равен 10,5 *см*, а гипотенуза — 37,5 *см*.

Как известно, длина искомого катета вычисляется по формуле $\sqrt{37{,}5^2-10{,}5^2}$. Сопоставим два возможных способа вычисления этого выражения.

Первый способ. Находим $37{,}5^2=1406{,}25$; находим $10{,}5^2=110{,}25$; вычитаем $1406{,}25-110{,}25=1296$; находим $\sqrt{1296}=36$. Итак, потребовалось выполнить четыре операции, причем по крайней мере три из них, по-видимому, будут сделаны письменно.

Второй способ. Не приступая к непосредственному вычислению выражения $\sqrt{37{,}5^2-10{,}5^2}$, предварительно преобразуем его: $\sqrt{37{,}5^2-10{,}5^2}=\sqrt{(37{,}5+10{,}5)\cdot(37{,}5-10{,}5)}=\sqrt{48\cdot 27}=4\cdot 3\sqrt{3\cdot 3}=4\cdot 3\cdot 3=36$. Оказалось, что предварительное упрощение выражения позволило сразу получить окончательный результат, причем все указанные преобразования нетрудно выполнить устно.

Пример 2. Решим такое уравнение:

$$10x^2-101x+10=0.$$

Сопоставим опять два возможных способа решения.

Первый способ. Поступим «по шаблону», т. е. немедленно используем формулу корней квадратного уравнения. Будем иметь:

$$x=\frac{101\pm\sqrt{101^2-4\cdot 10\cdot 10}}{20}=$$

$$=\frac{101\pm\sqrt{10201-400}}{20}=$$

$$=\frac{101\pm\sqrt{9801}}{20}=\frac{101\pm 99}{20};$$

$$x_1=10;\ x_2=\frac{1}{10}.$$

Всякое ли квадратное уравнение нужно решать по «шаблонной» формуле?

Второй способ. Замечаем, что в уравнении коэффициент при x^2 и свободный член одинаковы; значит, произведение корней равно единице, т. е. корни уравнения — числа взаимно обратные. Но сумма этих двух взаимно обратных чисел равна $\frac{101}{10}=10+\frac{1}{10}$. Теперь можно сразу назвать корни: один из них 10, другой $\frac{1}{10}$.

Нам удалось решить уравнение почти без вычислений; потребовалось лишь «увидеть» и использовать своеобразие коэффициентов этого уравнения.

Пример 3. Пусть потребовалось вычислить произведение

$$\sqrt[3]{10}\cdot\sqrt[3]{0{,}25}\cdot\sqrt[3]{12{,}5}\cdot\sqrt[3]{32}\,.$$

Если эти числа умножить последовательно в том порядке, как они написаны, то выполнить умножение, не прибегая к записи, будет трудно. Если же вспомнить и применить переместительное и сочетательное свойства произведения, то умножение будет выглядеть так:

$$\left(\sqrt[3]{10}\cdot\sqrt[3]{12{,}5}\right)\cdot\left(\sqrt[3]{32}\cdot\sqrt[3]{\frac{1}{4}}\right)=\sqrt[3]{125}\cdot\sqrt[3]{8}=$$
$$=5\cdot2=10.$$

Очевидно, такое вычисление совсем легко выполнить «в уме».

Пример 4. Найти корни уравнения $x^2-17x+52=0$. Конечно, решить это уравнение по формуле корней квадратного уравнения нетрудно. Но если опять, не прибегая к каким-либо записям, вспомнить теорему Виета и искать такие два числа, сумма которых 17, а произведение 52, то после одной-двух проб «в уме» можно сразу уверенно назвать корни уравнения:

$$x_1=4;\qquad x_2=13.$$

Рассмотренные примеры показывают, как облегчается решение многих обычных задач, как резко упрощаются вычисления, если не поддаваться соблазну сразу, без раздумья воспользоваться привычным шаблоном, а пытливо искать, не допускает ли предложенная задача удобного решения «в уме». Что же нужно, чтобы такие попытки были успешны? Как научиться, не прибегая сразу к трафаретным приемам, находить там, где это возможно, такой подход к задаче, который обеспечивает наиболее «изящные» способы ее решения?

Во-первых, конечно, необходимо сознательное и твердое знание основных формул и теорем. Во-вторых, нужна вдумчивость, умение видеть в обычной на первый взгляд задаче то числовое своеобразие, которое нередко заключено в ее условии. И, в-третьих, наконец, нужна настойчивость в поисках «остроумного» решения предложенной задачи, позволяющего быстро и просто получить нужный результат.

УМЕЕТЕ ЛИ ВЫ РАЗМЫШЛЯТЬ?

Привычка к размышлению приносит богатые плоды: она развивает ту особую математическую смекалку, которая может выручить в самых различных случаях. Иногда даже может случиться, что она окажет неожиданную услугу, позволив уверенно восстановить частично забытую формулу.

Вот несколько примеров.

Потребовалась формула $S=\frac{1}{2}ab\cdot\sin C$ для площади треугольника, но память «подвела»: вы забыли, какая тригонометрическая функция является здесь множителем — $\sin C$ или $\cos C$. И вот вы рассуждаете так: эта формула общая, она годна для вычисления площади всякого треугольника, в том числе и прямоугольного с катетами a и b; но тогда $C=90°$, а $\cos 90°=0$. Поэтому если допустить, что сомнительный множитель в формуле площади $\cos C$, то площадь треугольника окажется равной нулю. Явная нелепость! С другой стороны, $\sin C=\sin 90°=1$, и мы получаем $S=\frac{1}{2}ab$, т. е. известную формулу для площади прямоугольного треугольника. Теперь сомнений нет: тригонометрический множитель в формуле — $\sin C$.

Другой пример. Вы колеблетесь, забыв, какой вид имеет формула Герона для площади треугольника: $S=\sqrt{(p-a)(p-b)(p-c)}$ или $S=\sqrt{p(p-a)(p-b)(p-c)}$. И здесь также простое соображение поможет вам. Вы будете рассуждать так: левая и правая части формулы должны быть одного и того же измерения: площадь выражается в квадратных единицах; p, $p-a$, $p-b$, $p-c$ — линейные величины; произведения $(p-a)(p-b)(p-c)$ и $p(p-a)(p-b)(p-c)$ соответственно 3-го и 4-го

измерения; квадратные корни из этих произведений будут иметь измерения $\frac{3}{2}$ и 2. Сомнения отпали: верна формула $S=\sqrt{p(p-a)(p-b)(p-c)}$.

Трудно перечислить все случаи, когда умение наблюдать и умение считать позволяют «на ходу» легко обнаружить то, что, казалось бы, обязательно требует письменного расчета. Вот, например, в магазине покупают $7\frac{1}{2}$ *м* сатина ценой по 13 руб. 20 коп. за метр. Продавец выписывает чек; на нем указано 99 руб. 60 коп. Покупатель, не отходя от прилавка, буквально в течение нескольких секунд уверенно устанавливает, что сумма, указанная в чеке, неверна. Попробуем проследить за ходом мысли нашего наблюдательного покупателя.

Стоимость всей покупки, выраженная в копейках, есть произведение $1320\times7\frac{1}{2}$. Произведение не изменится, если один из сомножителей разделить на 10, а другой умножить на 10. Значит, стоимость покупки 132×75 (копеек). Каждый из сомножителей — число, кратное 3. Значит, произведение должно быть кратно 9. Но в чеке написано 99 руб. 60 коп. = =9960 коп. — число, сумма цифр которого (24) не делится на 9. Это противоречие и указывает, что чек выписан неправильно.

Попробуем теперь устно подсчитать, сколько же стоит сатин. В условии задачи как будто нет того числового своеобразия, которое позволяет применить изобретательный устный счет. На самом же деле зоркий глаз обнаружит и здесь возможность не только устно сосчитать стоимость покупки, но даже сделать это двумя различными способами.

Первый способ. Произведение 13,2 руб. на $7\frac{1}{2}$ равно произведению 6,6 руб. на 15 (мы разделили здесь первый сомножитель на 2, а второй умножили на 2). Применяя теперь известный способ умножения чисел на 15, будем иметь:

$$6{,}6\cdot15=6{,}6\cdot10+\frac{6{,}6\cdot10}{2}=$$
$$=66+33=99\,(\text{руб.})$$

Сколько стоят 7,5 м?

Второй способ. Заметив, что $7\frac{1}{2}$ составляет $\frac{3}{4}$ от 10, можем стоимость покупки в рублях выразить так: $(13{,}2\cdot10)\cdot\frac{3}{4}=132\cdot\frac{3}{4}=[(132:2):2]\cdot3=$ $=(66:2)\cdot3=33\cdot3=99$.

Может возникнуть мысль, что в рассмотренных нами до сих пор примерах удобные приемы устного решения удалось использовать только потому, что числовые данные или форма математического выражения были специально подобраны. Такая мысль была бы ошибочной. Верно лишь то, что те разнообразные приемы устных вычислений, которыми мы пользовались, можно применить далеко не во всех случаях. Так, например, если в рассмотренных ранее двух примерах на решение квадратного уравнения удалось, минуя формулу корней, обойтись без записей, то это отнюдь не означает, что почти всегда при решении квадратных уравнений можно обойтись без этой формулы и связанных с ней письменных вычислений. Но, с другой стороны, неверно было бы считать, что различные способы легких и быстрых устных вычислений и преобразований, которые были здесь показаны, применимы лишь в исключительных, «избранных» случаях. Гораздо чаще, чем это кажется, внимательный и зоркий глаз сумеет подметить и остроумно использовать числовую «индивидуальность» вычисляемого выражения или своеобразие его формы.

Чтобы научиться «видеть» и научиться находчиво считать, нужны прежде всего опыт, привычка к размышлению и сообразительность. Для арифметических расчетов «в уме» большую помощь окажет, кроме того, знание общих принципов и специальных приемов, применяемых при устном счете. Укажем некоторые наиболее важные и наиболее интересные из таких приемов устного счета.

В обычном, «бытовом» счете (в магазине, дома, в трамвае) и в счете на производстве, когда рабочий или инженер должен сделать несложный предварительный расчет, большей частью приходится иметь дело с двузначными и реже с трехзначными числами. При этом считать чаще всего приходится «на ходу» и достаточно быстро. Поэтому особенно важно научиться производить «в уме» действия над двузначными и отчасти трехзначными числами. В тех же случаях, когда производятся вычисления со сравнительно большими числами, то надежнее, да в конечном счете и легче, сделать такие расчеты письменно или, если есть возможность, на счетных приборах.

Некоторые простейшие приемы устного счета рассматриваются в школе. В частно-

сти, учащимся обычно предлагают устные упражнения, показывающие, как упрощаются вычисления при умелом использовании законов арифметических действий.

Указываются также некоторые простейшие специальные приемы устного счета (умножение на 5, 15, 25, 50, отдельные приемы процентных вычислений и т. д.). На них здесь мы останавливаться не будем и ограничимся следующими указаниями.

СЛОЖЕНИЕ «В УМЕ» НЕСКОЛЬКИХ ДВУЗНАЧНЫХ ЧИСЕЛ

Пусть нужно сложить: $37+85+29+42$. Поступим так: сначала сложим все десятки: $3+8+2+4$ и запомним результат: 17. Затем сложим все единицы: $7+5+9+2$, получим 23. Прибавив к 17 десяткам 2 десятка, получим 19 десятков. Результат найден: 193.

Так же поступаем, если среди слагаемых имеются трехзначные числа. Например, сложим $228+39+485+91$. Складываем десятки (пользуясь при этом переместительным и сочетательным свойствами сложения). Будем иметь: $(22+48)+(3+9)=70+12=82$. Затем складываем единицы: $(8+5)+(9+1)=23$. Всего оказалось 84 десятка и 3 единицы. Сумма 843.

УМНОЖЕНИЕ «В УМЕ» ДВУЗНАЧНЫХ ЧИСЕЛ

Общим приемом умножения «в уме» двух двузначных чисел является умножение «крестиком» (этот прием называют иногда индусским способом умножения).

Пользуясь алгеброй, рассмотрим сначала умножение двух двузначных чисел в общем виде.

Имеются два двузначных числа: $\overline{ab}=10a+b$ и $\overline{cd}=10c+d$, где a, b, c и d — цифры[1]. Умножим $\overline{ab}$ на $\overline{cd}$:

$$(10a+b)\,(10c+d)=100ac+10ad+10bc+bd=$$
$$=ac\cdot 100+(ad+bc)\cdot 10+bd.$$

Словами этот результат можно прочесть так: произведение $\overline{ab}\cdot\overline{cd}$ содержит ac сотен, $(ad+bc)$ десятков и bd единиц. Если $bd\geqslant 10$, т. е. bd содержит десятки, то их прибавляют к $(ad+bc)$ десяткам, а если образовавшееся число десятков содержит сотни, то их прибавляют к ac сотням.

Покажем теперь на числовом примере, как применяется такое умножение.

Пусть требуется умножить 76 на 28. Поступаем так:

(схема приведена лишь для пояснения; на практике все вычисления проводятся «в уме»).

Как проще умножить?

Умножим 6 единиц на 8 единиц, получаем 48 единиц. Затем умножаем «крестиком» (чтобы получить $ad+bc$ десятков): 7 дес. на 8 ед. и 6 дес. на 2 ед., получаем 56 дес. + 12 дес. = 68 дес. и, прибавив еще 4 дес. (содержащихся в 48 ед.), получим 72 дес. Находим теперь ac, умножая 7 дес. на 2 дес.; получим 14 сотен. Но в 72 десятках содержится 7 сотен; значит, всего сотен у нас 21. Итак, произведение содержит 21 сотню, 2 десятка и 8 единиц, т. е. оно равно 2128.

Мы получили здесь произведение 2128 с помощью общего способа, пригодного для умножения двух любых двузначных чисел. Интересно попутно отметить, что в этом умножении двух как будто случайных чисел находчивый вычислитель обнаружит, как это часто бывает, то числовое своеобразие, которое позволит выполнить умножение «в уме» еще более просто.

Действительно, заметив, что $76=75+1$, будем умножать так:

$$28\cdot 76=28\cdot(75+1)=28\cdot 75+28=$$
$$=28(50+25)+28=28\cdot 50+28\cdot 25+28=$$
$$=\frac{2800}{2}+\frac{1400}{2}+28=1400+700+28=2128.$$

УМНОЖЕНИЕ ДВУХ ДВУЗНАЧНЫХ ЧИСЕЛ, БЛИЗКИХ К 100

Всякое двузначное число можно представить в виде $100-a$. Будем называть a недостатком данного числа до 100. Если данные числа близки к 100, то недостатки их — срав-

[1] $\overline{ab}$ — двузначное число, в котором a — цифра десятков и b — цифра единиц; ab (без черты сверху) — как всегда, произведение чисел a и b.

нительно небольшие числа, удобные для устных вычислений. Рассмотрим такое умножение в общем виде:

$$(100-a)(100-b)=100\cdot 100-100a-100b+ab=(100-a-b)100+ab.$$

Это выражение показывает: чтобы получить число сотен искомого произведения, достаточно из одного сомножителя (например, $100-a$) вычесть недостаток другого сомножителя (т. е. b) и к полученной разности приписать произведение недостатков ab, если ab — число двузначное. Если ab — однозначное число, например 8, то приписывается 08.

Пример. Умножить 87 на 94.

Первый недостаток 13, второй 6. Из 87 вычитаем 6 (или из 94 вычитаем 13), получаем 81. К 81 приписываем $13\cdot 6=78$. Произведение 8178.

Идею этого интересного способа легко распространить и на умножение двух трехзначных чисел, близких к 1000. Умножим, например, 985 на 992. Первый недостаток 15, второй 8. Вычитая 8 из 985 (или 15 из 992), получим 977 — число тысяч искомого произведения. Приписав к 977 произведение недостатков $15\cdot 8=120$, получим произведение 977 120.

ПРОЦЕНТНЫЕ ВЫЧИСЛЕНИЯ

Простейшие приемы процентных вычислений, рассматриваемые в школе, нетрудно использовать и в некоторых более сложных случаях процентных вычислений. Прежде всего обратим внимание на то, что $p\%$ от числа a составляет $\frac{ap}{100}$ и $a\%$ от числа p составляет $\frac{pa}{100}$; но $\frac{ap}{100}=\frac{pa}{100}$. Поэтому, если это удобно, мы всегда можем заменить вычисление $p\%$ от a вычислением $a\%$ от p.

Как легче произвести действия с процентами?

Пусть надо найти 72% от 85. Легче найти 85% от 72. Но 85% от 72 составляют 72 без 15% от 72, а 15% от 72 есть сумма $7{,}2+3{,}6=10{,}8$. Искомое число найдено: $72-10{,}8=61{,}2$.

Другой пример: найти 72,8% от $37\frac{1}{2}$. И здесь будем искать $37\frac{1}{2}\%$ от 72,8. «Ключ» к устному решению заключается в известном факте: $12\frac{1}{2}\%$ от числа — все равно, что $\frac{1}{8}$ часть этого числа. А так как $37\frac{1}{2}\%=12\frac{1}{2}\%\cdot 3$, то весь расчетный процесс сведется к нахождению $\frac{3}{8}$ от 72,8. Деля 72,8 на 8, получим 9,1, а искомое число $9{,}1\cdot 3=27{,}3$.

ОСОБЫЕ СЛУЧАИ ВОЗВЕДЕНИЯ ЧИСЕЛ В КВАДРАТ

Полезно обратить внимание на два случая возведения чисел в квадрат: целых чисел, оканчивающихся цифрой 5, и смешанных чисел, дробная часть которых равна $\frac{1}{2}$. В каждом из этих случаев сначала сформулируем общее правило и докажем справедливость его.

Правило I. Чтобы возвести в квадрат целое число, оканчивающееся цифрой 5, достаточно число десятков этого числа умножить на следующее натуральное число и к произведению приписать 25.

Доказательство. Всякое число, оканчивающееся цифрой 5, можно представить в виде $10a+5$, где a — число десятков этого числа. Тогда

$$(10a+5)^2=100a^2+100a+25=100a(a+1)+25=a(a+1)\cdot 100+25.$$

Последнее выражение полностью соответствует тексту правила.

Пример. Возвести в квадрат 145. Умножаем число десятков 14 на 15, получаем 210 и приписываем 25; $145^2=21025$.

Как быстро возвести в квадрат такое число?

Правило II. Чтобы возвести в квадрат смешанное число, дробная часть которого равна $\frac{1}{2}$, достаточно целую часть смешанного числа умножить на следующее натуральное число и к произведению приписать $\frac{1}{4}$. Доказывается оно так же, как и правило I.

Пример. Возвести в квадрат $19\frac{1}{2}$. Умножаем 19 на 20, получаем 380 и к 380 приписываем $\frac{1}{4}$; $\left(19\frac{1}{2}\right)^2=380\frac{1}{4}$.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Мы рассмотрели здесь лишь отдельные, наиболее важные приемы устного счета. Вряд ли имеет смысл пытаться запомнить большое число специальных правил, так как без частого применения они неизбежно будут забываться. Да и как ни полезны такие правила, все же для овладения устным счетом гораздо важнее развить в себе пытливость и ту смекалку, без которых не обойтись, когда никакие выученные правила не помогают. Известен, например, такой случай: ученикам V класса сельской школы было предложено умножить «в уме» 84 на 84. Один мальчик почти сразу дал ответ: 7056. На вопрос, как он считал, мальчик ответил: «Да я просто отнял 144 от 7200». Если мы теперь проследим ход устных вычислений мальчика, то увидим, что он считал так:

$$84\cdot 84=(12\cdot 7)\cdot(12\cdot 7)=(12\cdot 12)\cdot(7\cdot 7)=$$
$$=144\cdot(50-1)=144\cdot\frac{100}{2}-144=7200-144.$$

Иногда самая загадочная задача, решению которой не помогут никакие правила, легко решается простым «соображением». Например, требуется расшифровать числовой ребус

$$a\cdot c\cdot\overline{ac}=\overline{ccc},$$

где a и c — цифры. Из данного равенства вытекает: $a\cdot\overline{ac}=\overline{ccc}:c$. Но при любом однозначном c частное $\overline{ccc}:c=111$, т. е. $a\cdot\overline{ac}=111$. Но 111, как произведение однозначного множителя на двузначный, может быть представлено единственным образом: $3\cdot 37$. Ребус расшифрован:

$$a=3,\quad c=7\quad\text{и}\quad 3\cdot 7\cdot 37=777.$$

В заключение заметим, что смекалка, которую часто называют «математической смекалкой»,— не только основа успешного устного счета. Она может принести человеку неоценимую услугу в любой области его деятельности.

СЧЕТНЫЕ ПРИСПОСОБЛЕНИЯ

(счеты, логарифмическая линейка, арифмометр)

Если вы зайдете в бухгалтерию какого-нибудь учреждения или в вычислительную лабораторию или посмотрите, как работают инженеры, которые производят многочисленные расчеты, словом, если вы приглядитесь к работе людей, имеющих дело с вычислениями, то увидите, что они широко пользуются различными вспомогательными средствами для облегчения вычислительного труда. Счетоводы используют счеты и арифмометры; инженеры прибегают к помощи различных таблиц и графиков и часто пользуются счетными линейками с многочисленными шкалами, от которых с непривычки может зарябить в глазах; лаборанты-вычислители, включая моторы счетных машин, выполняют с большой скоростью различные операции над многозначными числами.

В больших же вычислительных лабораториях вы сможете увидеть машины, решающие с удивительной быстротой сложнейшие математические задачи, достаточно лишь задать им программу, по которой они должны вести вычисления.

Уже в далекие времена люди стремились облегчить вычислительную работу, свести сложные операции к более простым. Например, в древнем Вавилоне деление старались заменить умножением делимого на число, обратное делителю; об этом свидетельствуют дошедшие до нас клинописные таблички, на которых при различных значениях n даны значения дроби $\frac{1}{n}$.

В XVI в. в Европе получил распространение так называемый простаферетический способ умножения чисел (от греческих слов «простезис» — прибавление и «афайрезис» — отнятие), основанный на тождестве

$$a\cdot b=\frac{(a+b)^2}{4}-\frac{(a-b)^2}{4}.$$

Если составить таблицу значений функции $\frac{x^2}{4}$ для целых значений x, то для вычисления произведения ab (a, b — целые числа) достаточно будет определить сначала $a+b$ и $a-b$, затем найти по таблице числа $\frac{(a+b)^2}{4}$ и $\frac{(a-b)^2}{4}$

и из первого вычесть второе. В таблице нет необходимости помещать (при нечетных значениях x) дробные части чисел $\frac{x^2}{4}$, так как при окончательном вычитании они все равно уничтожаются.

Справа приведено для примера несколько строк такой таблицы.

Дес. \ Ед.	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
0	0	0	1	2	4	6	9	12	16	20
1	25	30	36	42	49	56	64	72	81	90
2	100	110	121	132	144	156	169	182	196	210
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
47	55225	55460	55696	55932	56169	56406	56644	56882	57121	57360
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
199	990025	991020	992016	993012	994009	995006	996004	997002	998001	999000

Если $a=253$, а $b=224$, то $ab=56\ 882-210=56\ 672$ (так как $a+b=477$ и $a-b=29$); аналогично

$$1273\cdot761=994\,009-55\,696=938\,313.$$

Конечно, удобнее пользоваться таблицами, дающими сразу произведения данных чисел; например, в таблицах О' Рурка в каждой из табличек с заголовками от 10 до 999 помещены произведения числа, стоящего в заголовке, на все числа от 1 до 99; однако, чтобы иметь возможность найти сразу в таблице произведение двух трехзначных чисел, надо было бы объем и без того толстых таблиц увеличить в 10 раз. В то же время простаферетические таблицы, дающие те же возможности, содержали бы всего лишь 200 строк.

Простаферетические таблицы уступили место в начале XVII в. таблицам логарифмов, облегчавшим не только умножение, но и деление чисел и извлечение корней.

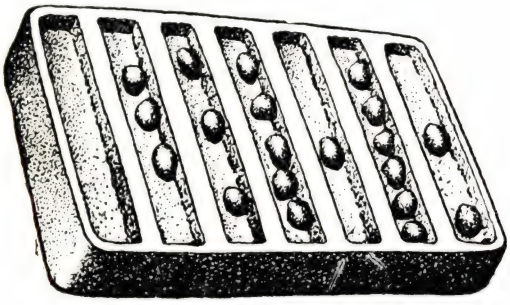


Рис. 1. Абак.

К далекому прошлому восходит также изобретение простейших счетных приборов. Так, в Древней Греции и в Риме для облегчения вычислений применялась счетная доска — а б а к (рис. 1). В зависимости от того, на какую полосу клали камешки, они заменяли то или другое число. Абак применялся долгое время и в Западной Европе.

В Китае уже в глубокой древности появился счетный прибор с у а н - п а н, принявший в более позднее время вид рамы с проволоками, разделенной промежуточной планкой на две части (рис. 2). Каждая из двух косточек, находящихся правее планки, заменяет пять единиц, а каждая из пяти косточек левее планки — одну единицу. Придвигая к планке косточки, можно изобразить на суан-пане любое целое число.

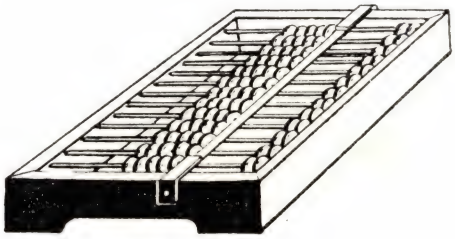


Рис. 2. Суан-пан.

Японский с о р у б а н отличается от суан-пана только тем, что правее планки вместо двух косточек помещена одна косточка.

В России с давних пор употреблялся значительно более удобный прибор — р у с с к и е с ч е т ы (рис. 3).

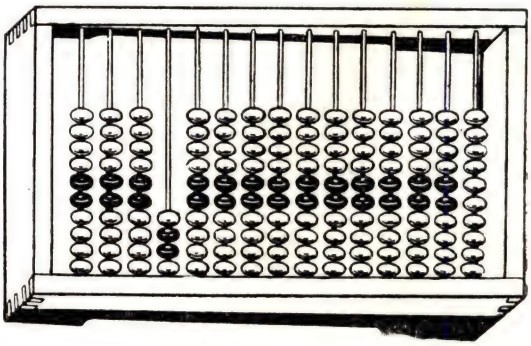


Рис. 3. Русские счеты.

СЧЕТЫ И ПАЛОЧКИ НЕПЕРА

В далеком прошлом счеты имели несколько иную конструкцию — косточки нанизывались на тонкие веревки. Затем веревки заменили проволоками, и уже в начале XVIII в. счеты приняли в основном современный вид. Правда, до введения у нас метрической системы на двух проволоках помещали по 4 косточки — тогда широко распространены были четвертые доли различных единиц.

В метрической системе единицы измерения делятся на 10, 100 и т. д. частей, и теперь нет необходимости в проволоках с четырьмя косточками.

Для действий с десятичными дробями полезно иметь «подвижные запятые» — согнутые проволочки, надеваемые на левый край рамы.

Возможно, что многим из вас счеты могли показаться мало интересным прибором. Но приглядитесь, с каким искусством работают на счетах кассиры, счетоводы — словом, все, кому приходится производить за день множество операций сложения и вычитания многозначных чисел!

Для выполнения этих операций счеты особенно удобны — в этом вы сами можете легко убедиться. Например, для сложения чисел 4683 и 2719 надо, отложив на нижних проволоках число 4683, прибавить к нему (рис. 4) последовательно числа: 2000 (2 косточки в разряде тысяч), 700 (так как в разряде сотен справа имеется всего 4 косточки, то надо прибавить 1 косточку в разряде тысяч и отнять 3 косточки в разряде сотен), 10 (1 косточку в разряде десятков) и, наконец, 9 (прибавив 1 косточку в разряде десятков и отняв 1 косточку в разряде единиц); после этого 10 косточек в разряде десятков надо заменить одной косточкой в разряде сотен.

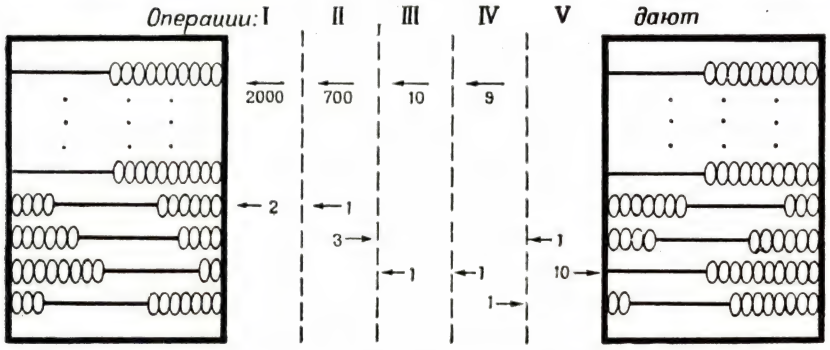


Рис. 4. Сложение на счетах.

Аналогично производится вычитание. Например, для вычисления разности 428 — 269 мы должны, отложив число 428, последовательно вычесть из него 200 (2 косточки в разряде сотен), затем 60 (отнимая 1 косточку в разряде сотен и прибавляя 4 косточки в разряде десятков) и, наконец, 9 (отнимая 1 косточку в разряде десятков и прибавляя 1 косточку в разряде единиц) (рис. 5).

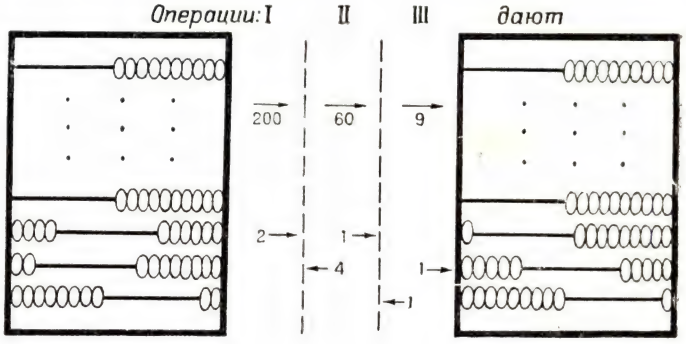


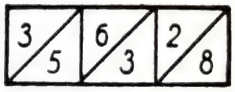
Рис. 5. Вычитание на счетах.

Для умножения и деления на счетах очень полезны палочки Непера — простое приспособление, облегчающее умножение и деление многозначных чисел (описание их было дано в 1617 г. изобретателем логарифмов шотландским математиком Непером).

Для изготовления этого простого счетного прибора надо на узких полосках картона, плотной бумаги или, лучше всего, гладкой фанеры выписать в квадратных клетках произведения однозначного числа, стоящего в заголовке палочки, на числа 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, записывая в каждой клетке число десятков произведения выше, а число единиц — ниже диагонали (см. рис. 6, где слева изображена еще вспомогательная палочка, облегчающая определение номеров клеток).

Палочки Непера позволяют сразу находить произведения многозначных чисел на любое однозначное число. Например, желая найти произведение 594·7, мы должны положить рядом с вспомогательной палочкой палочки с заголовками 5, 9, 4

(см. рис. 6); тогда в седьмой строчке будем иметь:



откуда заключаем, что $594 \times 7 = 4158$. Действительно, в каждой клетке выше наклонной линии стоит цифра, которая при обычном умножении «в уме» сразу прибавляется к единицам высшего разряда; следовательно, в искомом числе будет 8 единиц, 5 десятков $(2+3)$, 11 сотен $(6+5)$ — одну сотню пишем, а одну тысячу отмечаем «в уме», что дает вместе с тремя тысячами, стоящими в левой клетке над наклонной чертой, 4 тысячи.

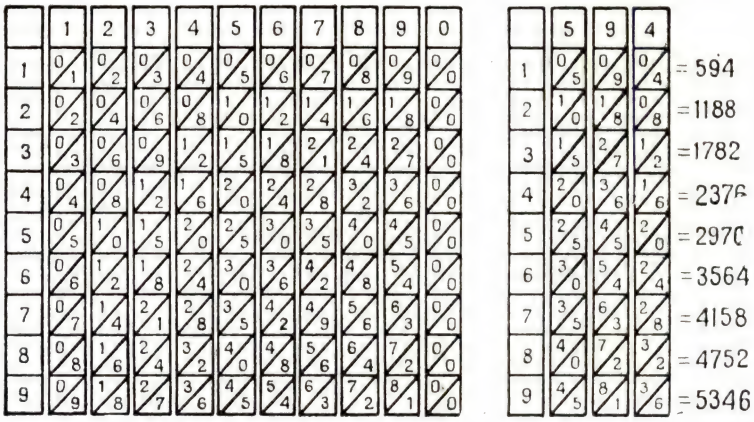


Рис. 6. Палочки Непера.

Так как в множимом могут встретиться несколько одинаковых цифр, то полезно иметь по нескольку палочек с каждым заголовком.

При перемножении многозначных чисел палочки Непера позволяют сразу выписывать

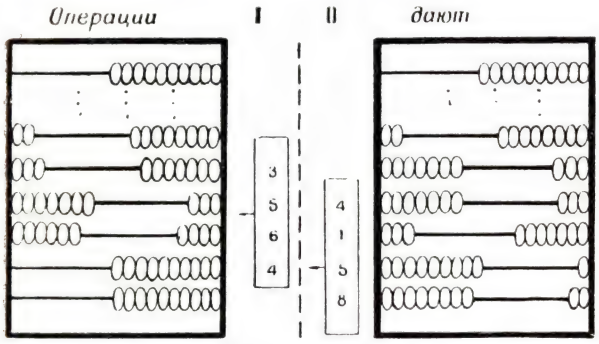


Рис. 7. Умножение на счетах.

произведения множимого на отдельные числа множителя, а при делении — определять очередную цифру частного и произведение этой цифры на делитель. Например:

$$\begin{array}{r} \times\ 594 \\ 467 \\ \hline \rightarrow 4158 \\ \rightarrow 3564 \\ \rightarrow 2376 \\ \hline 277\,398 \end{array} \qquad \begin{array}{r|l} 29467 & 594 \\ \cline{2-2} \rightarrow 2376 & 49{,}6 \\ \hline 5707 & \\ \rightarrow 5346 & \\ \hline 3610 & \\ \rightarrow 3564 & \\ \hline 46 & \end{array}$$

(отмеченные стрелками числа находятся сразу с помощью палочек Непера — см. рис. 6).

Если умножение (594×467) производится на счетах, то дело сводится к сложению 2376 сотен (594×4), 3564 десятков (594×6) и 4158 единиц (594×7) (рис. 7).

При делении же на счетах (29 467:594) надо делимое отложить на нижних проволоках (или чуть выше) и найти ближайшее меньшее к числу 2946 (это будет $2376 = 594 \times 4$). Вычитая это число из 2946, надо одновременно отложить (рис. 8) на верхней проволоке первую цифру частного (4). Затем ищется ближайшее меньшее к 5707 (это будет $5346 = 594 \times 9$); отложив на 2-й сверху проволоке вторую цифру частного (9), надо 5346 вычесть из 5707, и т. д.

На рис. 8 делимое взято с двумя десятичными знаками (ниже подвижной запятой — разряды десятых и сотых долей), а в частном (наверху) подвижная запятая отделяет целую часть частного от дробной.

На счетах можно также извлекать корни квадратные из чисел. Так как сумма последовательных нечетных чисел (начиная с единицы) равна $1+3+5+\ldots+(2n-3)+(2n-1)=n^2$, то вычисление $\sqrt{N}$ можно свести к проверке того, сумма скольких слагаемых вида $1, 3, 5 \ldots$ не будет превосходить числа N. При больших N такая проверка утомительна, поэтому лучше последовательно определять отдельные цифры искомого корня. Для этого разбивают число на грани и из старшей грани вычитают $1, 3, 5, \ldots$ до тех пор, пока это возможно. Таким способом получают цифру старшего разряда искомого числа (a). К остатку присоединяют следующую грань и из полученного числа последовательно вычитают $20a+1$, $20a+3$, $20a+5$ и т. д. На рис. 9 показано извлечение этим способом квадратного корня из 74 529.

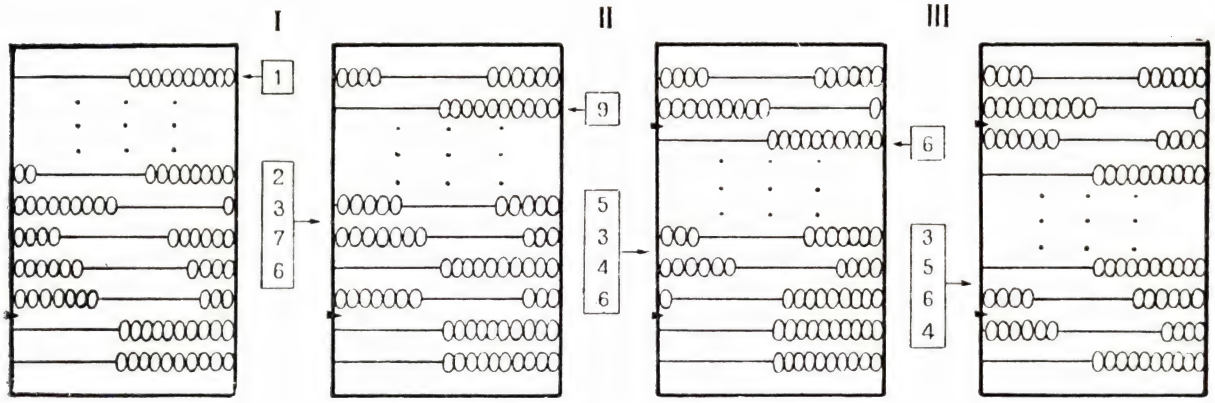


Рис. 8. Деление на счетах.

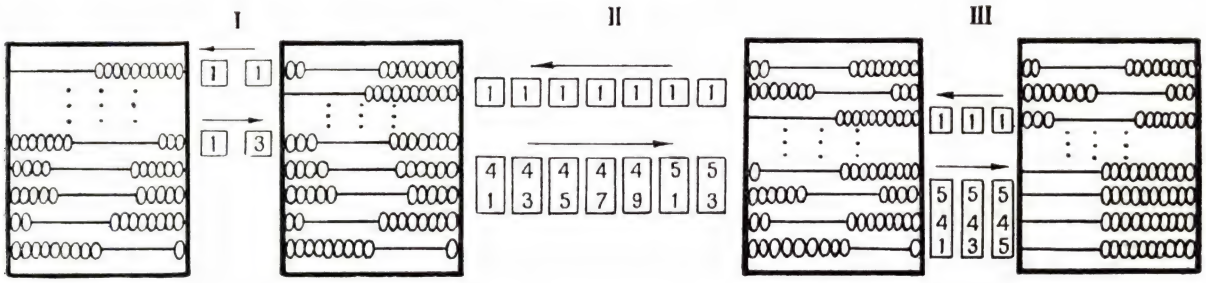


Рис. 9. Извлечение квадратного корня на счетах.

ЛОГАРИФМИЧЕСКАЯ ЛИНЕЙКА

Хотя счеты и палочки Непера сильно облегчают выполнение арифметических операций, при более сложных расчетах, связанных, например, с вычислением корней высших степеней, с вычислением значений тригонометрических функций и т. п., счеты и палочки Непера помочь уже не могут.

В этих случаях особенно полезны таблицы логарифмов. Часто достаточная точность вычислений обеспечивается четырехзначными таблицами, но иногда приходится пользоваться пятизначными и даже семизначными таблицами логарифмов.

В тех же случаях, когда достаточно произвести расчеты с 2—3 верными цифрами, можно обойтись даже трехзначными таблицами. Тут вместо таблиц с успехом может быть использована логарифмическая, или счетная, линейка — простой счетный прибор, чрезвычайно удобный благодаря своим небольшим размерам и простоте выполнения на нем разнообразных операций.

Она состоит из корпуса, движка (узкая планка, перемещающаяся вдоль корпуса в специальных пазах) и бегунка с визирной линией (металлическая рамка со стеклом, на котором нанесена тонкая линия). На рис. 10 изображен поперечный разрез логарифмической линейки, а на рис. 11 — вид на линейку сверху.

Главную роль на линейке играют логарифмические шкалы, позволяющие

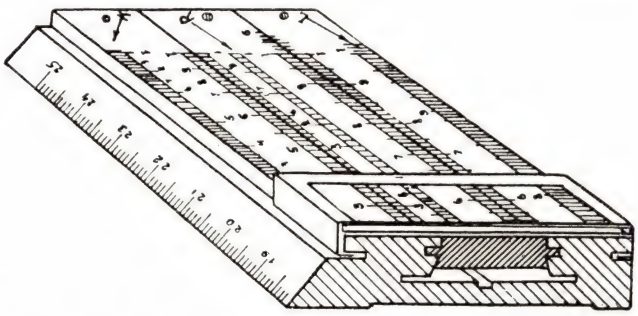


Рис. 10. Поперечный разрез логарифмической линейки.

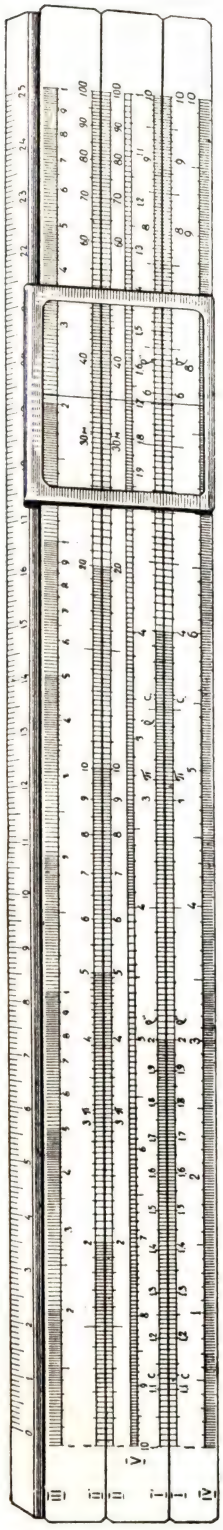


Рис. 11. Вид логарифмической линейки сверху.

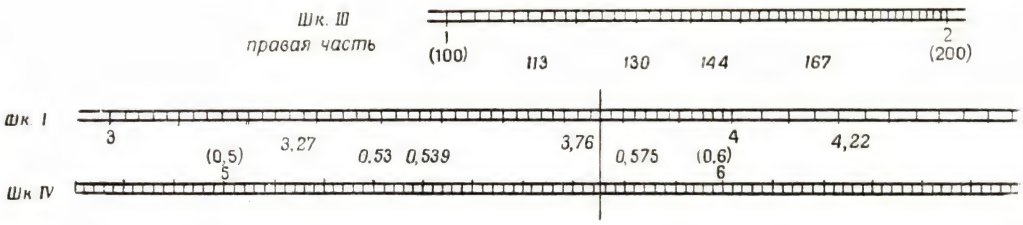


Рис. 12. Как следует читать числовые отметки на шкале.

умножение и деление чисел заменять сложением и вычитанием некоторых отрезков.

Для построения логарифмической шкалы выбирается единица масштаба E (модуль шкалы) и от начала шкалы откладываются — при различных значениях x — отрезки, равные $E\lg x$; в конце каждого из этих отрезков ставится (или подразумевается) числовая отметка — соответствующее значение x. Так построены при $E=25$ *см* шкала I (на корпусе) и примыкающая к ней шкала I′ (на движке) (рис. 11). У логарифмических шкал II (на корпусе) и II′ (на движке) модуль $E_1=\frac{E}{2}=12{,}5$ *см*, а у шкалы III (верхняя часть корпуса) модуль $E_2=\frac{E}{3}=$ $=8\frac{1}{3}$ *см*.

Числовые отметки в средней и в правой части шкалы III следует мысленно увеличить соответственно в 10 и в 100 раз, а на равномерной шкале IV — уменьшить в 10 раз (они дадут при этом расстояние соответствующих точек от начала шкалы — при единице масштаба $E=25$ *см*).

Не все точки на шкалах снабжены числовыми отметками. Для определения числовой отметки любой точки какой-нибудь шкалы надо определить число «делений» (интервалов), заключенных между ближайшими точками шкалы, снабженными числовыми отметками, и «цену» каждого деления. Например, интервал 3—4 на шкале I имеет 10 крупных делений, каждое из которых содержит 5 маленьких делений. Так как на концах интервала стоят числовые отметки 3 и 4, то «цена» каждого крупного деления в интервале 3—4 будет 0,1, а мелкого — 0,02. В интервале 4—5 шкалы I «цена» крупного деления равна 0,1, а мелкого — 0,05; в интервале 1—2 (100—200) в правой части шкалы III «цена» крупного деления — 10, а мелкого — 2; на равномерной шкале IV «цена» каждого крупного деления — 0,01, а мелкого — 0,002.

Чтобы хорошо считать на логарифмической линейке, надо научиться быстро и правильно определять числовые отметки точек на разных участках любой шкалы. На рис. 12 отдельные участки шкалы даны в увеличенном масштабе и указаны числовые отметки некоторых точек. При этом если точки не отмечены на шкалах штрихами, то их числовые отметки определяются приблизительно, «на глаз».

Шкала IV позволяет (с помощью визирной линии) измерять с точностью до одной тысячной расстояния от начала шкалы I до любой ее точки a, т. е. находить трехзначный логарифм числа a. В дальнейшем мы будем говорить «точка a» вместо «точка с числовой отметкой a». Из рис. 12 видно, что расстояние от начала шкалы I до точки 3,76 равно приблизительно $0{,}575E$; следовательно, $\lg 3{,}76\approx 0{,}575$; аналогично $\lg 478=\lg 100+\lg 4{,}78\approx 2{,}675$.

УМНОЖЕНИЕ И ДЕЛЕНИЕ

При умножении и делении чисел всегда можно, перенося в данных числах запятые, выполнять на линейке операции над числами,

заключенными между 1 и 10; место же запятой в полученном числе легко определить, прикинув в уме — после грубого округления данных чисел — примерные размеры ожидаемого результата.

Так как $\lg(ab)=\lg a+\lg b$ и $\lg\frac{a}{b}=\lg a-\lg b$, то умножение и деление чисел сводится к сложению и вычитанию логарифмов этих чисел, а последнее осуществляется совсем просто с помощью движка[1].

Условимся называть начало и конец шкалы I′ соответственно началом и концом движка.

Если a и b заключены между 1 и 10, то умножение a на b производится следующим образом:

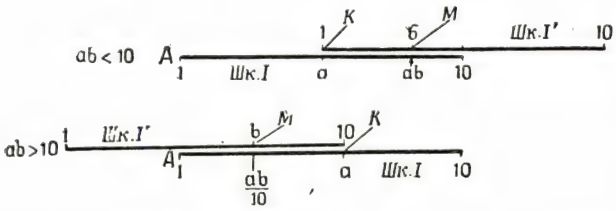


Рис. 13. Схема умножения на логарифмической линейке.

если $ab<10$, то начало движка совмещается с точкой a шкалы I и искомое произведение ab находят на шкале I около точки b шкалы I;

если $ab>10$, то с точкой a шкалы I совмещается конец движка; тогда около точки b, взятой на шкале I′, на шкале I будет точка $\frac{ab}{10}$. Действительно, из рис. 13 видно, что в первом случае $AM=AK+KM=E\lg a+E\lg b=E\lg(ab)$, а во втором случае $AM=AK-MK=E\lg a-(E-E\lg b)=E\lg\frac{ab}{10}$.

При делении a на b надо совместить точку a шкалы I с точкой b шкалы I′; тогда при $a>b$

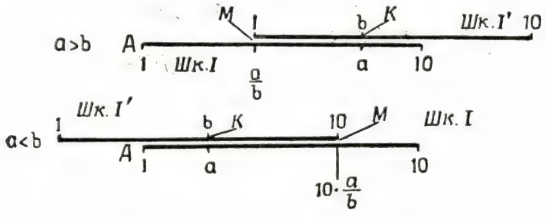


Рис. 14. Схема деления на логарифмической линейке.

[1] Читателям, не знакомым с теорией логарифмов, полезно проверить эти формулы при различных частных значениях a и b, определяя $\lg a$ и $\lg b$ с помощью шкал I и IV.

частное $\frac{a}{b}$ найдем на шкале I у начала движка, а при $a<b$ на шкале I у конца движка найдем $\frac{10a}{b}$. Действительно, из рис. 14 видно, что при $a>b$ $AM=AK-MK=E\lg a-E\lg b=E\lg\frac{a}{b}$, а при $a<b$ $AM=AK+KM=E\lg a+(E-E\lg b)=E\lg\frac{10a}{b}$.

ВОЗВЕДЕНИЕ В СТЕПЕНЬ И ИЗВЛЕЧЕНИЕ КОРНЯ

Эти операции выполняются на линейке по той же схеме, как и при пользовании таблицами логарифмов. Если, например, $x=\sqrt[7]{0{,}24^4}$, то, логарифмируя, получим $\lg x=\frac{4}{7}\lg 0{,}24\approx\frac{4}{7}\cdot\bar{1}{,}380$ (с помощью шкал I и IV), или, после подсчета, $\lg x\approx\bar{1}{,}646$. Для мантиссы 0,646, взятой на шкале IV, на шкале I найдем число 4,43; учитывая, что характеристика равна — 1, будем иметь: $x\approx 0{,}443$. Но возведение чисел в квадрат и в куб, а также извлечение корней квадратных и кубических осуществляется значительно проще с помощью шкал I, II и III. Если при каком-то положении бегунка визирная линия проходит через точки a, b, c шкал I, II, III (рис. 15), то отсекаемые ею отрезки будут равны, т. е. будем иметь $E\lg a=\frac{E}{2}\lg b=\frac{E}{3}\lg c$, откуда $a=\sqrt{b}=\sqrt[3]{c}$, или $b=a^2$ и $c=a^3$.

Таким образом, для возведения числа a, заключенного между 1 и 10, в квадрат (в куб), надо взять точку a на шкале I и найти с помощью визирной линии точку $b=a^2$ на шкале II (точку $c=a^3$ на шкале III).

При $a<1$ и при $a>10$ надо предварительно представить a в виде $a=10^k\cdot a'$, где a' заключено между 1 и 10.

При вычислении $\sqrt{b}$ или $\sqrt[3]{c}$ надо предварительно представить b в виде $b=10^{2p}\cdot b'$, а c — в виде $c=10^{3q}\cdot c'$, где b' заключено между

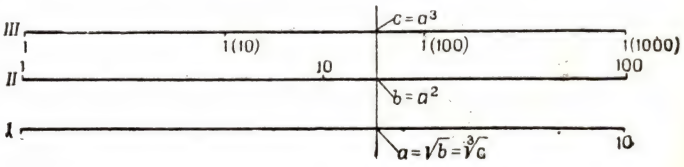


Рис. 15. Схема вычисления a^2, a^3, $\sqrt{b}$, $\sqrt[3]{c}$.

1 и 100, а c' — между 1 и 1000, и искать с помощью визирной линии на шкале I $\sqrt{b'}$ или $\sqrt[3]{c'}$. Например, $\sqrt[3]{0{,}0002} = \sqrt[3]{10^{-6} \cdot 200} \approx 10^{-2} \cdot 5{,}86 = 0{,}0586$.

Мы не будем останавливаться на рассмотрении тригонометрических шкал (на обратной стороне движка), позволяющих находить приближенные значения тригонометрических функций и производить над ними различные действия, и «обратной» шкалы на движке, удобной при перемножении нескольких чисел.

Существует множество приемов, позволяющих быстро выполнять операции, включающие целый ряд умножений и делений, решать на логарифмической линейке квадратные уравнения и т. п.; с ними читатель может ознакомиться по специальным руководствам (например, по книге Д. Ю. Панова «Счетная линейка»).

Нам хотелось лишь показать, как на линейке остроумно использованы основные свойства логарифмов.

Применять логарифмическую шкалу стали уже в начале XVII в., спустя несколько лет после появления первых таблиц логарифмов. Правда, сложение и вычитание отрезков, заменяющих логарифмы чисел, производили тогда с помощью циркуля. Лишь в середине XVII в. для этой цели стали пользоваться движком. Бегунок был введен в середине XIX в., после чего логарифмическая линейка приняла в основном современный вид.

Для увеличения точности вычислений можно увеличить модуль основной логарифмической шкалы. Чтобы не увеличивать при этом размеров прибора, логарифмическую шкалу иногда «разрезают» и наносят по частям вдоль образующих цилиндра, а движок заменяют прозрачным полым цилиндром, который может легко передвигаться по основному цилиндру.

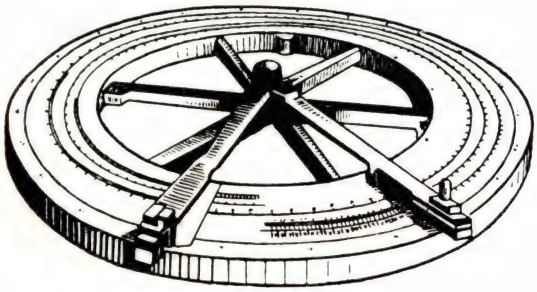


Рис. 16. Круглая «линейка»-гигант.

Иногда логарифмические шкалы наносят на края диска и кольца, внутри которого диск может вращаться; такие круглые логарифмические «линейки» имеют вид карманных часов. Существуют также «линейки»-гиганты с диаметром в 1 *м* и модулем логарифмической шкалы в 3 *м* (рис. 16). Точность вычислений на таких линейках, конечно, значительно выше, но зато для обслуживания их требуется 2 человека.

СЧЕТНЫЕ МАШИНЫ

Изобретение первых счетных машин связано с именами Паскаля и Лейбница (XVII в.). С 1820 г. в Париже стали производить фабричным путем счетные машины Лейбница со «ступенчатыми валиками»; однако за 60 лет было изготовлено всего около полутора тысяч машин.

Особенно способствовало распространению счетных машин изобретенное в 1874 г. петербургским инженером Однером колесо с выдвигающимися зубцами. В конце XIX в. стали появляться различные разновидности арифмометра Однера. Одной из них является также широко распространенный у нас арифмометр «Феликс». Он состоит (рис. 17) из корпуса и каретки (К), которую,

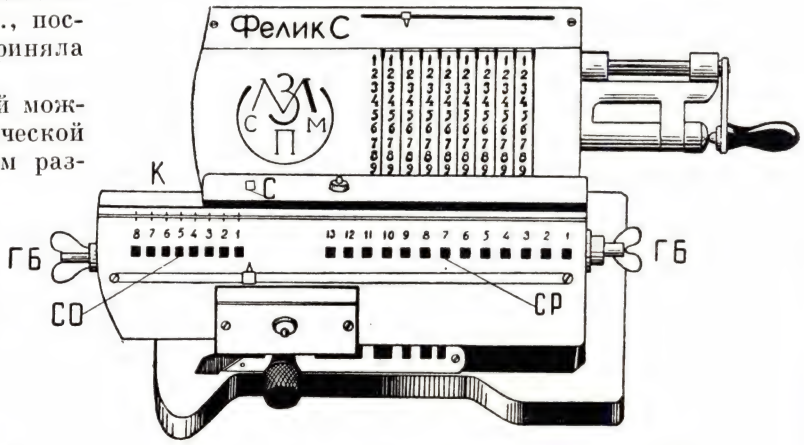


Рис. 17. Арифмометр «Феликс» (внешний вид).

нажимая на специальный рычаг, можно передвигать вправо и влево вдоль корпуса арифмометра. В крышке каретки имеются две группы окошек: справа — 13 окошек счетчика результатов (СР) — в них при работе на арифмометре появляются результаты сложения, вычитания и умножения данных чисел,

а слева — 8 окошек счетчика оборотов (СО) — в них при умножении появляется множитель, а при делении — частное.

С помощью гасительных барашков (ГБ) можно добиться того, чтобы во всех окошках счетчика результатов или счетчика оборотов появились нули. Окошки обоих счетчиков пронумерованы. Будем говорить, что каретка находится в положении *n*, если стрелка С на крышке корпуса указывает на окошко счетчика оборотов с номером *n* (будем писать «К в пол. *n*»).

Чтобы составить ясное представление о работе арифмометра, снимем крышки с корпуса и каретки. Внутри корпуса (рис. 18) мы увидим барабан Однера (БО), приводимый во вращение рукояткой и состоящий из девяти основных колес Однера (КО) (перенумеруем их справа налево цифрами 1, 2, 3, ...,8, 9)* и четырех дополнительных (в левой части барабана).

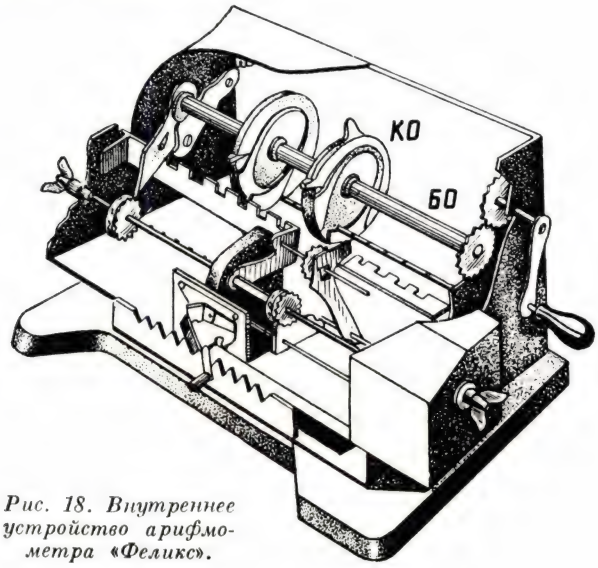


Рис. 18. Внутреннее устройство арифмометра «Феликс».

Вращение рукоятки и вращение барабана Однера условимся называть прямыми, когда рукоятка движется по схеме «к нам, вверх, от нас, вниз».

При каждом обороте барабана специальный «толкатель» (рис. 18), связанный с осью барабана, поворачивает цифровое колесо счетчика оборотов, находящееся против стрелки *C* (рис. 17), на $\frac{1}{10}$ полного оборота, и при прямом вращении рукоятки в окошке появляются последовательно белые цифры 1, 2, 3, ..., 8, 9, а при обратном — красные цифры 1, 2, ..., 7, 8 и, наконец, белая цифра 9.

В счетчике результатов на ободе каждого цифрового колеса стоят 10 цифр от 0 до 9. К каждому колесу справа прикреплена шестеренка с десятью зубцами, а слева — один большой зубец.

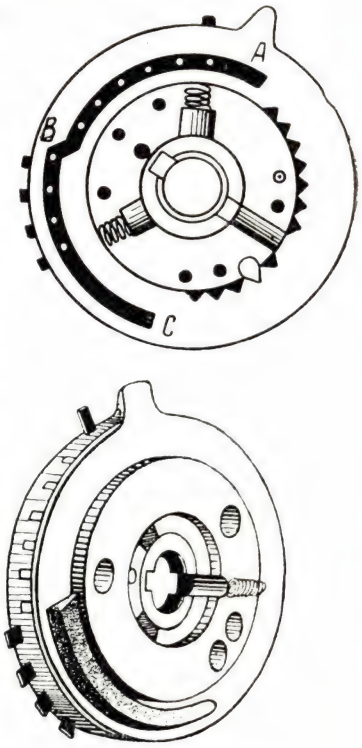


Рис. 19. Колесо Однера.

В каждом основном колесе Однера имеется толстый диск (рис. 18), на цилиндрический выступ которого надет установочный диск (он на рис. 19 изображен отдельно) с установочным рычажком. В установочном диске имеется фигурный вырез *ABC*, в который входят штифтики девяти выдвигающихся зубцов, передвигающихся в радиальных пазах толстого диска. Каждый зубец либо «потоплен» в толстом диске, либо чуть выдвинут из него наружу. Это зависит от того, входит ли штифт зубца в дугу *AB* или в дугу *BC* фигурного выреза установочного диска. Передвигая установочный рычажок в прорези крышки корпуса до определенной цифры, мы выдвигаем наружу соответствующее число зубцов.

Кроме выдвигающихся зубцов, в каждом основном колесе Однера (кроме первого) имеются еще два отклоняющихся зубца, отведенные специальными пружинками от плоскости, в которой находятся выдвигающиеся зубцы. Их назначение — поворачивать цифровое колесо, находящееся против колеса Однера, на $\frac{1}{10}$ часть оборота, когда соседнее справа колесо сделает полный оборот.

На дополнительных колесах имеются только отклоняющиеся зубцы.

Установим на барабане число 2035, т. е. выдвинем с помощью установочных рычажков

* На рисунке для простоты показаны только два колеса Однера.

на первом колесе 5 зубцов, на втором — 3 и на четвертом — 2 зубца. При прямом обороте рукоятки каждый выдвинутый зубец, действуя через промежуточную шестеренку, повернет находящееся под ним цифровое колесо на $\frac{1}{10}$ оборота так, что в счетчике результатов (если перед этим он был погашен) появится число 2035.

Если установить затем на барабане, например, число 7 и сделать медленно прямой оборот рукоятки, то легко проследить, как в 1-м окошке счетчика результатов будут появляться (по мере того как будут срабатывать выдвинутые зубцы 1-го колеса Однера) цифры 6, 7, 8, 9, 0, 1, 2. Но в тот момент, когда цифра 9 сменится на 0, большой зубец с левой стороны цифрового колеса чуть отклонит специальный рычажок («десяточник»), находящийся на оси, параллельной оси счетчика результатов. Десяточник отклонит слегка влево отклоняющийся зубец второго колеса Однера, и последний повернет второе цифровое колесо на $\frac{1}{10}$ оборота (это произойдет чуть позднее — после появления в первом окошке цифры 2). В итоге счетчик результатов покажет число 2042 (2035+7).

Если затем сделать медленно обратный оборот рукоятки, то можно проследить, как в первом окошке вместо цифры 2 появятся последовательно 1, 0, 9, 8, 7, 6, 5, причем в тот момент, когда 0 будет сменяться на 9, десяточник отклонится и заставит сработать (чуть позднее) другой отклоняющийся зубец второго колеса, и во втором окошке цифра 5 сменится на 4.

Аналогично будет обстоять дело во всех других окошках при смене 9 на 0 (при прямом вращении барабана) или при смене 0 на 9 (при его обратном вращении).

Рассмотрим, как выполняются на арифмометре основные операции. При вычислении $a \pm b$ (a и b — целые) надо погасить счетчик результатов и поставить каретку в положение 1. Установив на барабане Однера число a, надо прямым оборотом рукоятки перенести его в счетчик результатов. Установив затем на барабане число b, можно его прямым оборотом прибавить к a, а обратным — вычесть из a. Так же ищется и алгебраическая сумма нескольких чисел.

Для умножения a на b надо погасить оба счетчика и установить множимое a на барабане. Если, например, $b=437$, то, переводя каретку в положение 3, надо сделать 4 прямых оборота (в счетчике результатов появится $a \cdot 400$), затем в положении 2 сделать 3 прямых оборота (в счетчике результатов к $a \cdot 400$ добавится $a \cdot 30$) и в положении 1 — 7 прямых оборотов (в счетчик добавится еще $a \cdot 7$). Таким образом, в счетчике оборотов будет фиксирован множитель (437), а в счетчике результатов — искомое произведение. В данном примере можно обойтись и меньшим числом оборотов, сделав в положениях 3 и 2 по 4 прямых оборота, а в положении 1 — 3 обратных оборота:

$$a \cdot 437 = a \cdot 400 + a \cdot 40 - a \cdot 3.$$

При делении a на b для получения частного с наибольшим числом десятичных знаков надо установить делимое в крайних левых окошках счетчика результатов, перевести каретку в положение 8 (если делитель содержит не больше 5—6 цифр), а на барабане установить делитель либо над самыми левыми окошками счетчика результатов, либо на один разряд правее, в зависимости от того, будет ли первая цифра b меньше или больше первой цифры a (при одинаковых первых цифрах надо сравнить вторые цифры, и т. д.). После этого надо погасить счетчик оборотов.

Вычитая число b из числа, стоящего под ним в счетчике результатов, столько раз, сколько окажется возможным, получим в счетчике оборотов первую цифру частного (если сделать «невозможное вычитание», т. е. из меньшего числа вычесть большее, то раздастся звонок и в левых окошках счетчика результатов появятся девятки — в этом случае надо прямым оборотом рукоятки восстановить положение, бывшее перед «невозможным вычитанием»).

Затем многократное вычитание числа b надо произвести из числа, которое получается из остатка присоединением к нему следующей цифры числа a. Для этого каретку следует передвинуть на один разряд влево («подвести это число под число b») и, проделав все воз-

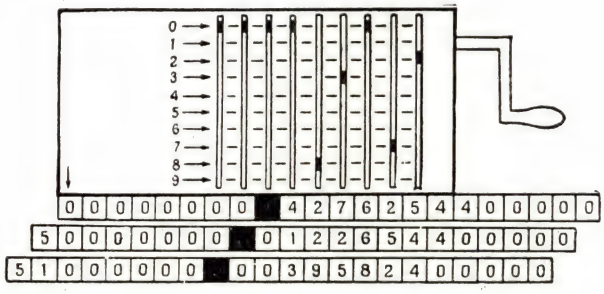


Рис. 20. Как производится деление на арифмометре.

можные вычитания, получить в 7-м окошке счетчика оборотов вторую цифру частного. Тем же путем получаются и остальные цифры частного.

На рис. 20 изображены исходное положение при делении 42 762 544 на 83 072 и показания счетчиков после определения первой и второй цифр частного.

Арифмометр относится к числу наиболее простых и распространенных малых счетных машин. Барабан Однера используется и в других машинах, имеющих значительные конструктивные отличия от арифмометра.

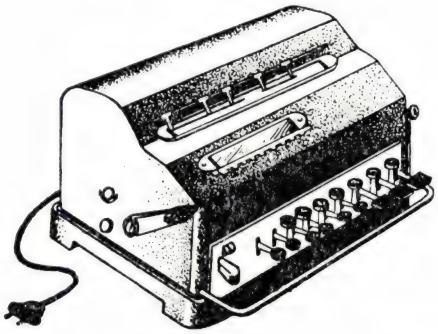


Рис. 21. Полуавтоматическая десятиклавишная вычислительная машина ВК-2.

Например, в счетных машинах ВК установка цифр осуществляется поочередно на отдельных колесах Однера не с помощью установочных рычажков, а нажатием на одну из десяти клавиш (рис. 21). В машинах ВК-2 счетчики остаются неподвижными, а перемещается барабан с установленным на нем числом.

Во многих машинах (например, на машине КСМ-1 — см. рис. 22) для установки чисел используется полная клавиатура — каждый разряд обслуживается своими десятью клавишами.

Помимо колес Однера, в современных машинах применяются и другие остроумные приспособления для того, чтобы цифровые колеса повертывались на угол, соответствующий той или иной цифре заданного числа.

Все большее распространение получают машины с электроприводом, где вычислителю не приходится затрачивать усилий на вращение рукоятки — его работу выполняет электромотор.

Существуют, наконец, малые счетные автоматические машины, в которых достаточно установить, например, делимое и делитель и включить мотор, чтобы все операции, в том числе и передвижение каретки, и прямые обороты после выполнения «невозможных вычитаний», производились автоматически, без участия вычислителя.

Однако имеются задачи настолько трудоемкие, что даже такие счетные автоматы не дают достаточного эффекта: хотя отдельные операции выполняются на них и очень быстро, но ведь

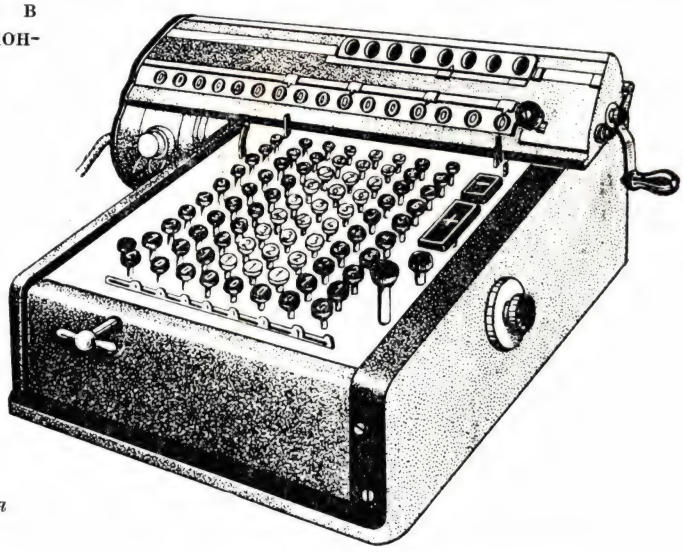


Рис. 22. Полноклавишная вычислительная полуавтоматическая машина КСМ-1.

каждый раз данные числа надо «ввести в машину», а на это уходит много времени.

В таких случаях часто большую пользу могут принести счетно-аналитические машины, включающие целый комплект машин (перфоратор, сортировка, табулятор и др.), каждая из которых имеет свое назначение. Так, на перфораторе данные числа «наносят» на картонные карточки стандартных размеров (перфокарты), пробивая на них в разных столбцах на месте той или иной цифры отверстия (на рис. 23 на перфокарте нанесено число 20 367).

Машина-сортировка, нащупывая металлической щеточкой в пропускаемых через нее перфокартах отверстия, с помощью включаемого при этом электромагнита сортирует карточки в соответствии с пробитой цифрой.

В табуляторе щеточки прощупывают отверстия сразу в нескольких столбцах и посылают «приказы», заставляющие поворачиваться

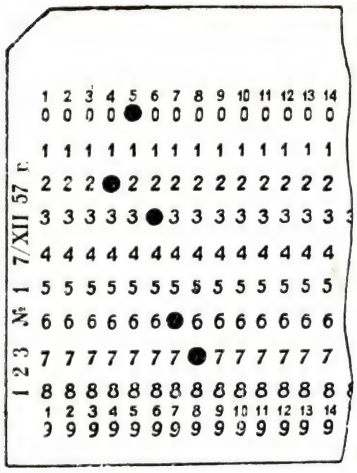


Рис. 23. Перфокарта.

на соответствующие углы цифровые колеса счетчика. На 45 столбцах перфокарты могут быть нанесены 6 семизначных чисел, которые одновременно можно послать в 6 счетчиков табулятора. Если, кроме того, учесть, что результаты, получающиеся в счетно-аналитической машине, сама машина может (при соответствующей ее настройке) использовать для дальнейших вычислений, то будет понятно, что некоторые трудоемкие задания такая машина решает очень быстро.

В начале XX в. счетно-аналитические машины применялись лишь для обработки материалов переписи населения. В настоящее время в связи с изобретением добавочных машин (вычислительный перфоратор) счетно-аналитические машины находят все большее применение при решении различных математических задач.

Но и они уступают в сложности решаемых задач и в скорости их решения электронным вычислительным машинам, изобретенным около 15 лет назад.

О том, как устроены и работают электронные счетные машины, говорится в следующей статье.

ЭЛЕКТРОННЫЕ СЧЕТНЫЕ МАШИНЫ

Услышав слово «машина», мы невольно представляем себе некое сооружение из механических деталей, которое либо обрабатывает материалы, либо поднимает или перевозит тяжести, либо преобразует один вид энергии в другой. При помощи таких машин человек, говоря образно, придал огромную силу своим рукам и ногам, сделал более производительным свой физический труд.

Счетные устройства тоже принято называть машинами. Но эти машины не выполняют никакой силовой работы.

На простейших машинах люди производят разные вычисления, решают арифметические задачи. А более сложные счетные устройства способны решать и сложнейшие задачи высшей математики. Многие из современных счетных машин пригодны даже для решения логических задач. Как видим, счетные машины — это устройства для переработки числового материала, сведений, сообщений, информации. Они в огромной степени облегчают людям умственный труд.

Вычислительная техника имеет богатую событиями историю. Но особенно бурно она развивается в наше время. Все многочисленнее и сложнее становятся математические задачи, решать которые нужно безотлагательно и точно.

Развитие вычислительной техники шло и продолжает идти по двум путям. Первым из них является создание машин непрерывного действия или машин-моделей.

Счетную линейку трудно назвать машиной. Но ею начинается длинный перечень устройств непрерывного действия, в конце которого мы находим современные электрические и электронные машины-модели. Некоторые из этих машин часто называют также интеграторами и дифференциальными анализаторами.

Второе направление в вычислительной технике — это создание машин прерывного (дискретного) счета или цифровых машин. Обыкновенные счеты также не назовешь машиной. Но они — родоначальники большого семейства цифровых устройств. Здесь мы найдем и обычный ручной арифмометр, и небольшие механические счетные машины с электрическим приводом, и более сложные электрифицированные счетно-аналитические машины, которые способны длинный ряд действий совершать автоматически. Существуют также цифровые машины, состоящие из электромагнитных реле. Но вершиной техники прерывного счета являются, конечно, электронные цифровые машины с программным управлением. Мы уделим им дальше немало внимания, а пока что вернемся к машинам-моделям. В чем смысл их работы?

по-прежнему они имеют дело с электрическими токами, хотя и очень слабыми. Этот способ моделирования называется физическим.

Хорошим примером физической модели может служить динамическая модель энергетической системы. Ее составляют из многочисленных маломощных электрических машин и трансформаторов. Каждая из машин изображает целую электростанцию или крупный завод, потребляющий энергию. Между частями модели можно делать любые соединения, нужные для изображения действительной электрической сети.

Электронные машины пригодны для решения логических задач, например для управления производственными процессами.

МАШИНЫ-МОДЕЛИ

Часто инженерам требуется установить, как протекает определенный физический процесс, а производить исследования на действующей установке оказывается невозможным. В таких случаях остается одно — изобразить его в уменьшенном виде, сделать модель и на модели изучать то, что происходит в действительности. Почти всякий реальный процесс в механике, гидравлике, электротехнике, радиоэлектронике и многих других областях науки и техники можно выразить математическим языком — языком формул и уравнений. Специалисты в таком случае говорят, что процесс описывается математически.

Когда инженеры исследуют или проектируют обширную электрическую сеть с многочисленными электростанциями, подстанциями и линиями электропередачи, они обычно пользуются ее моделью, или так называемым «расчетным столом». В модели такой электросети

Динамические модели позволяют достаточно точно изображать и изучать различные сложнейшие процессы, совершающиеся в настоящей энергосистеме. А это ведь очень важно для правильного проектирования новых мощных энергетических объединений. За создание отечественных электродинамических моделей акад. М. П. Костенко и проф. В. А. Веникову в 1958 г. была присуждена Ленинская премия.

Еще больше распространены модели другого типа —математические. В подобном устройстве исследуемая величина отлична по своей физической природе от величины, ее изображающей.

Сходство между действительным процессом и процессом в модели заключается только в том, что оба они описываются одинаковыми математическими уравнениями. Например, на языке математики одинаково изображаются колеба-

ния груза на пружине и колебание электрического тока в цепи, состоящей из катушки и конденсатора.

Пусть в каком-то сложном процессе участвуют разные величины: механические, электрические, тепловые и т. д. Выраженные уравнениями, все они оказываются «одетыми в одну форму» — математическую.

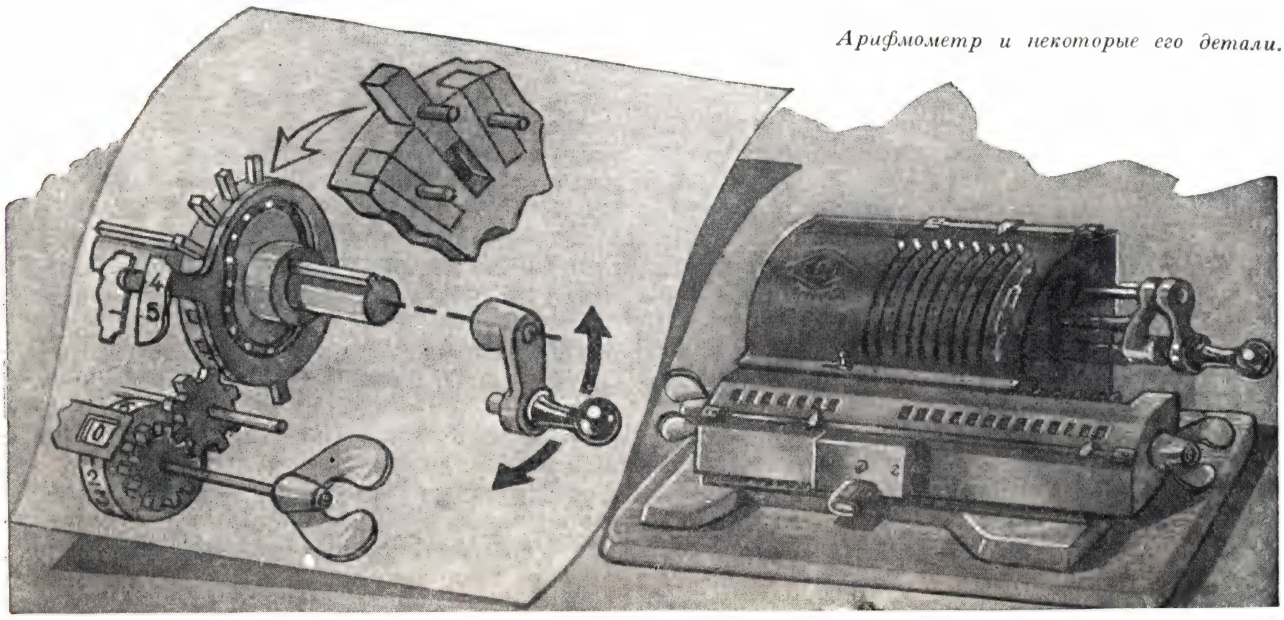
Знаки и буквы не заставишь складываться или перемножаться в счетной машине. Это ведь только знаки и буквы. Значит, все величины из нашего уравнения надо изобразить с помощью какой-то одной физически ощутимой существующей силы. Удобнее всего для этого применять электрическое напряжение. Но переменные величины и в ходе процесса и в его математическом изображении непрерывно взаимодействуют друг с другом: складываются, вычитаются, перемножаются. Значит, и в нашей математической модели электрические напряжения должны взаимодействовать по таким же законам и в строго заданном масштабе. Такова основная идея электрических моделирующих вычислительных машин.

Для каждого математического действия в модели есть свои устройства. Одни из них только складывают или вычитают электрические напряжения, другие перемножают, третьи выполняют интегрирование, и т. д. Специальные устройства предназначаются для получения различных сложных зависимостей между величинами: логарифмической, квадратичной, синусной и т. п. Перед решением задачи необходимые устройства (их может быть несколько десятков) соединяют проводами друг с другом в определенном порядке. Результаты решения задач в машине вырабатываются также в виде изменяющегося напряжения. А это напряжение в свою очередь записывается специальным электрическим прибором-самописцем, который изображает решение задачи в виде кривой линии на бумажной ленте.

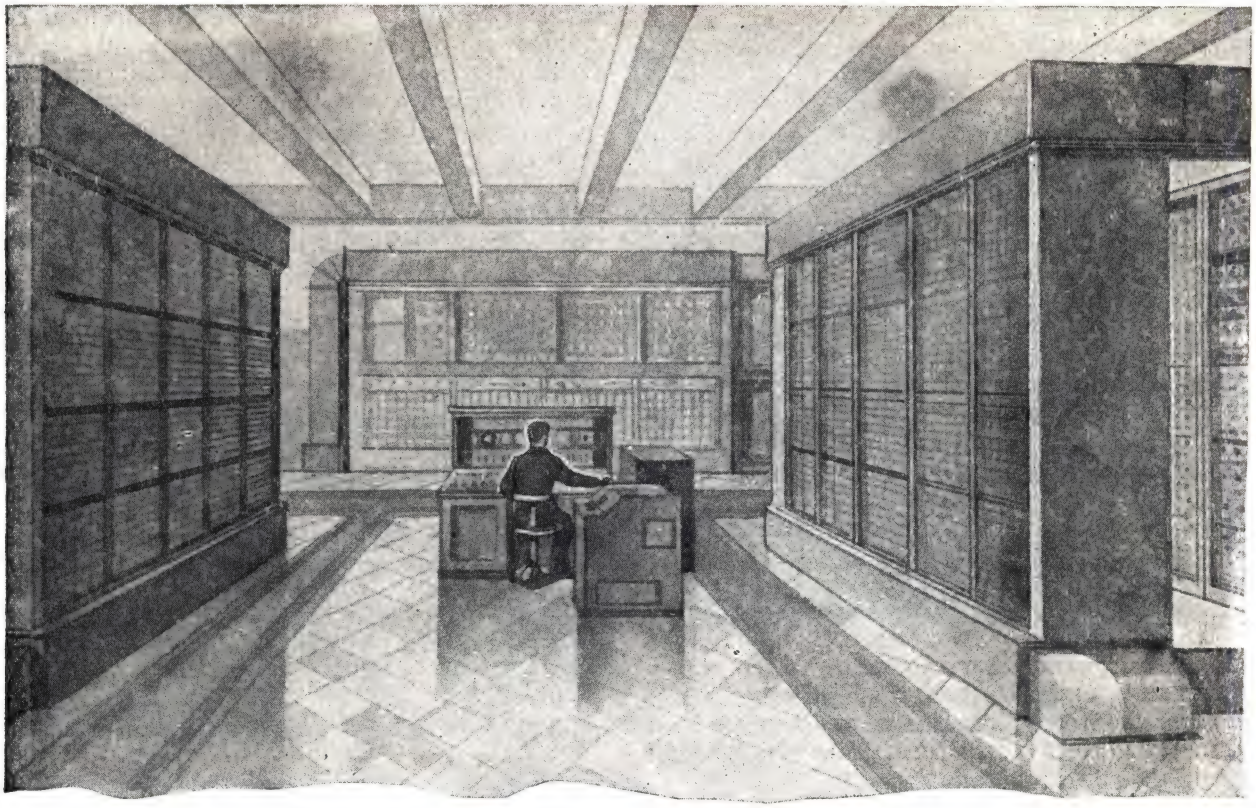
Среди существующих машин-моделей немало электронных. Они способны работать очень быстро. Решение задач на такой машине не требует большой подготовки, а ответы получаются в удобном для изучения виде. Но наряду со многими достоинствами есть у этих машин два существенных недостатка, с которыми далеко не всегда можно мириться. Во-первых, круг задач, поручаемых даже большой моделирующей машине, не очень широк, и, во-вторых, точность их ограничена, а значительно увеличить ее невозможно. Вот почему в целом ряде случаев машины-модели уступают поле деятельности машинам цифровым.

ЦИФРОВЫЕ МАШИНЫ

Из предыдущей статьи читатель уже знает, что принцип работы механических цифровых машин очень прост. Их основной частью явля-



Арифмометр и некоторые его детали.



Общий вид электронной цифровой машины «Стрела».

ются специальные зубчатые колеса. Для цифр каждого десятичного разряда отводится свое колесо, на котором десять зубцов означают цифры 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 0. Каждое колесо соединяется с последующим при помощи одного лишь зубца, и это происходит только после того, как будут пройдены все цифры данного разряда.

В электрифицированных счетных машинах не надо вертеть рукоятку. Нажимая клавиши, оператор набирает те числа, с которыми ему нужно производить действия, затем нажимает клавиш «сложить» или «умножить» и включает машину. Дальше все делает механизм.

А что можно сказать о точности действия цифровых машин?

По этому поводу можно не беспокоиться. Высокая точность лежит в самой сущности цифрового счета, на чем бы ни производить действия — арифмометре или электронной машине. Чтобы это было понятно, напишем какую-нибудь дробь, например 0,8943. Мы без труда сможем изобразить это число в счетной машине, если в ней будут колеса десятых, сотых, тысячных и десятитысячных долей. Но как быть, если нам понадобится изобразить дробь с бóльшим количеством знаков, например 0,89436012? Тогда попросту придется добавить еще четыре колеса, последнее из которых будет отсчитывать уже стомиллионные доли. Значит, от машины практически можно получить любую точность, увеличивая лишь количество содержащихся в ней элементов.

Очень важную роль в развитии вычислительной техники сыграла разработка принципа управления работой цифровых машин с помощью заранее подготовленных программ. Еще в прошлом веке была изобретена перфокарта — карточка из толстой бумаги с пробитыми в том или ином порядке отверстиями. Сначала при помощи перфокарт стали вводить в машины числа, изображаемые с помощью этих отверстий. Были созданы специальные устройства, в которых перфокарты ощупывались электрическими

контактами. Затем с помощью перфокарт научились отдавать машине и некоторые команды.

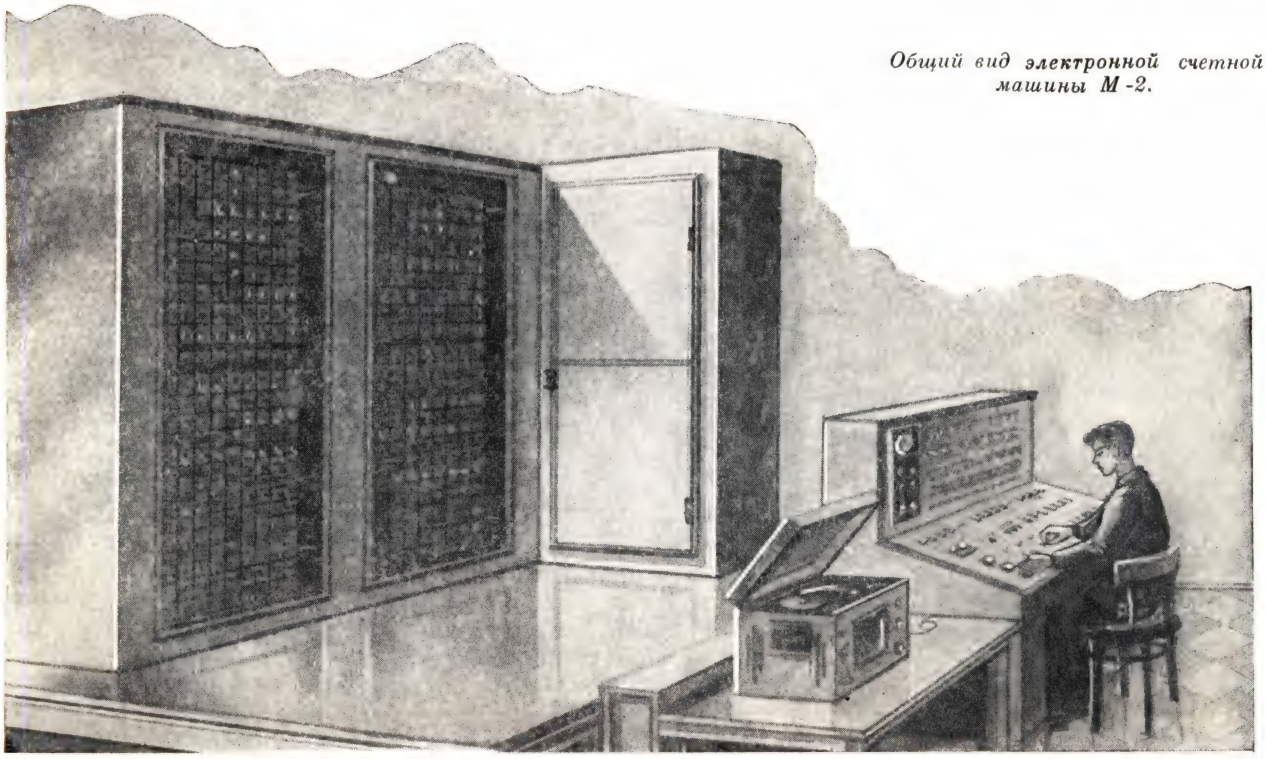
К сожалению, в механической машине невозможно автоматизировать выполнение многих команд. Поэтому при вычислениях на современной перфокарточной машине человеку приходится неоднократно вмешиваться в ее работу. Зато электричество, электронная техника создали замечательные возможности в деле автоматизации вычислений и применении принципа программного управления.

Механические машины, пусть даже и электрифицированные, считают достаточно медленно. В бухгалтерии, финансовом деле этот недостаток не ощущается. Но различные отрасли науки, техники, экономики, промышленности стали выдвигать все более многочисленные и разнообразные и, что очень важно, все более длинные задачи. Задача в миллион, десять миллионов, сто миллионов арифметических действий стала в наше время обычным явлением. И естественно, что только радиоэлектроника — техника высоких частот, огромных скоростей — позволила разрешить две главные задачи вычислительной техники: автоматизации счета и гигантского его ускорения. Так требования времени привели ученых и инженеров к созданию быстродействующих автоматических электронных машин с программным управлением. Первые из этих машин вступили в строй сравнительно недавно — в середине 40-х годов.

Ученые и инженеры первоначально направили свои усилия на создание универсальных больших быстродействующих машин. В наши дни во всем мире они насчитываются уже сотнями.

Большие цифровые машины созданы и у нас. Академия наук СССР несколько лет назад сконструировала две такие машины. Первая из них — БЭСМ (быстродействующая электронная счетная машина), созданная под руководством Героя Социалистического Труда, академика С. А. Лебедева, в свое время была признана самой быстродействующей из европейских машин. Вторая машина, названная М-2, была разработана под руководством члена-корреспондента Академии наук СССР И. С. Брука. Наша промышленность выпустила серию больших машин под названием «Стрела». Ее разработку возглавил Герой Социалистического Труда Ю. Я. Базилевский.

Однако большие машины дороги, сложны, требуют очень тщательного ухода и к тому



Общий вид электронной счетной машины М-2.

же чрезмерно громоздки. Поэтому в наши дни появилось множество разнообразных, более экономичных машин средних размеров. Они значительно дешевле, проще, компактнее и, несмотря на это, пригодны для решения очень многих задач. В мире насчитывается уже более трех тысяч таких машин, а их производство все увеличивается. Недалеко то время, когда в каждом нашем научном учреждении или проектном институте будет своя электронная машина.

МИР ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ИМПУЛЬСОВ

В машине-модели электрические напряжения все время меняются непрерывно и более или менее плавно. Величина любого такого напряжения играет решающую роль, так как изображает в определенном масштабе некоторую действительную величину. Зато все основные операции в цифровой машине совершаются с помощью кратковременных скачков электрического напряжения или тока. Эти скачки принято называть импульсами.

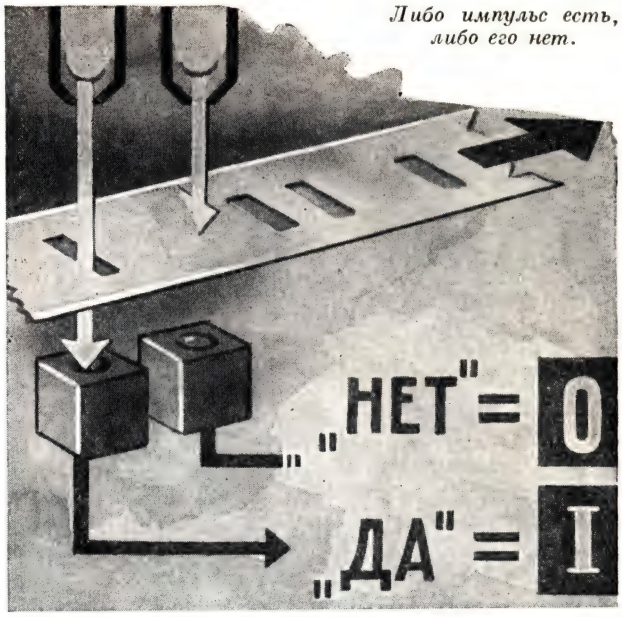
Когда мы считаем на счетах, нам безразлично, одинаковы костяшки или нет. Важно, чтобы все они были налицо и чтобы при счете мы не пропустили ни одной из них. Подобно этому, не так уж опасно, если величина импульсов будет в известных пределах меняться. Лишь бы соответствующие счетные устройства уловили каждый такой импульс.

Электрические импульсы в электронной машине являются переносчиками цифр, подобно костяшкам в деревянных счетах. Но каждый импульс существует ничтожно малое время — несколько миллионных долей секунды, а следуют импульсы друг за другом с огромной частотой — десятки и даже сотни тысяч в секунду. И, пока мы произносим слова «двадцать один», машина успевает выполнить несколько тысяч полноценных арифметических действий.

Итак, либо импульс есть, либо его нет. «Да» — «нет», «1» — «0» — вот и все сведения, которые связаны с существованием одного импульса. Конечно, это немного. Но если эти импульсы и паузы, эти единицы и нули брать в больших количествах, то можно комбинировать самые разнообразные сигналы, передавать с их помощью любые числа, любую информацию.

Однако нам важно не только передавать импульсы, но и выполнять арифметические действия. Как же это делается в цифровой машине?

Все мы настолько привыкли к десятичной системе счисления, что обычно не представляем



Либо импульс есть, либо его нет.

себе, как можно считать иначе [1]. В большинстве же электронных цифровых машин применяют не десятичную, а двоичную систему счисления. Почему так?

Основными частями машины служат электронные реле-триггеры. Каждый триггер — это схема, содержащая обычно две электронные лампы и несколько радиосопротивлений. Триггер управляется импульсами, поступающими в схему извне. Пусть напряжение на одной лампе высокое (тогда на другой оно будет низким) — это состояние можно считать «единицей». Под действием импульса лампы триггера меняют свое состояние на противоположное. Теперь в триггере содержится «нуль». Триггеры несут в машине самые различные обязанности, но самая важная из них — счет и хранение чисел. И так как возможных состояний у триггера два, то они полностью соответствуют именно двоичной системе.

Из подобных триггеров можно составлять и схемы для чисто десятичного счета. Но они настолько громоздки, что от их применения обычно отказываются.

Довольно часто можно встретить машины, построенные на основе десятичной, но двоично-кодированной системы. В этом случае каждую

[1] В статье «Как люди считали в старину и как писали цифры» рассказывается о некоторых системах счисления, применявшихся в прошлом,— троичной, пятеричной, двенадцатеричной и др.

десятичную цифру в отдельности изображают с помощью все тех же двоичных знаков «0» и «1». Машина строится при этом из двоичных ячеек, и работа ее протекает в соответствии с правилами двоичной арифметики.

Итак, двоичная система счисления является языком большинства электронных цифровых машин. Вот почему имеет смысл познакомиться с ней поближе.

О ДВОИЧНОЙ АРИФМЕТИКЕ

Десятичная система получила свое название потому, что для записи чисел она пользуется десятью знаками, или символами: 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 0. Эти знаки также составляют разряд единиц. Далее, числа от 10 до 99 содержат разряды десятков и единиц, потом следуют числа, содержащие разряд сотен, и т. д. Обычно мы забываем, как получаются многоразрядные десятичные числа. А составляются они как сочетание степеней числа 10, которое является основанием десятичной системы. Вот, например, полная запись числа 7502: $7502=7\cdot10^3+5\cdot10^2+0\cdot10^1+2\cdot10^0$.

Когда мы записываем число, то степени числа 10 мы опускаем, но каждому разряду отводим строго определенное место.

Эти рассуждения мы привели для того, чтобы лучше понять непривычную, но очень простую двоичную систему счисления. В этой системе числа записываются с помощью лишь двух знаков: 0 и 1. Уже поэтому можно догадаться, что многое в мире двоичных знаков проще, чем в десятичной системе. И в этом мы вскоре убедимся. А теперь рассмотрим такую таблицу:

В десятичной системе		В двоичной системе
0	=	0
1	$=2^0$	1
2	$=2^1$	10
3	=	11
4	$=2^2$	100
5	=	101
6	=	110
7	=	111
8	$=2^3$	1000
9	=	1001
10	=	1010
11	=	1011
12	=	1100
13	=	1101 и т. д.

Мы видим, что каждый раз, когда показатель степени у двойки в левом столбце увеличивается на единицу, соответствующее двоичное изображение числа приобретает еще один разряд ($2^0=1$; $2^1=10$; $2^2=100$; $2^3=1000$, и т. д.), а число нулей при единице в двоичной записи числа становится равным показателю степени в ее десятичном «близнеце». Эта простая зависимость подобна той, которую мы видели в десятичной системе. Она позволяет составлять из двоек в различных степенях любые числа, а отсюда без особого труда можно получать их двоичную запись — двоичный код.

Для примера попробуем записать в двоичной системе число 6:

$$6=4\cdot1+2\cdot1+1\cdot0=2^2\cdot1+2^1\cdot1+2^0\cdot0.$$

Обозначения двоичных разрядов 2^2, 2^1, 2^0 теперь можно опустить, зато каждому двоичному знаку мы отводим строго определенное место. Итак,

$$6=110.$$

Нетрудно получить двоичную запись числа 7: в младшем разряде — разряде единиц прибавится единица:

$$7=111.$$

По такому же образцу мы можем получить двоичное изображение любого числа. И в каждом случае мы будем иметь дело с разными сочетаниями нулей и единиц.

Арифметические действия с двоичными числами исключительно просты: ведь совершаются они только над нулями и единицами. Начнем со сложения. Вот все его правила:

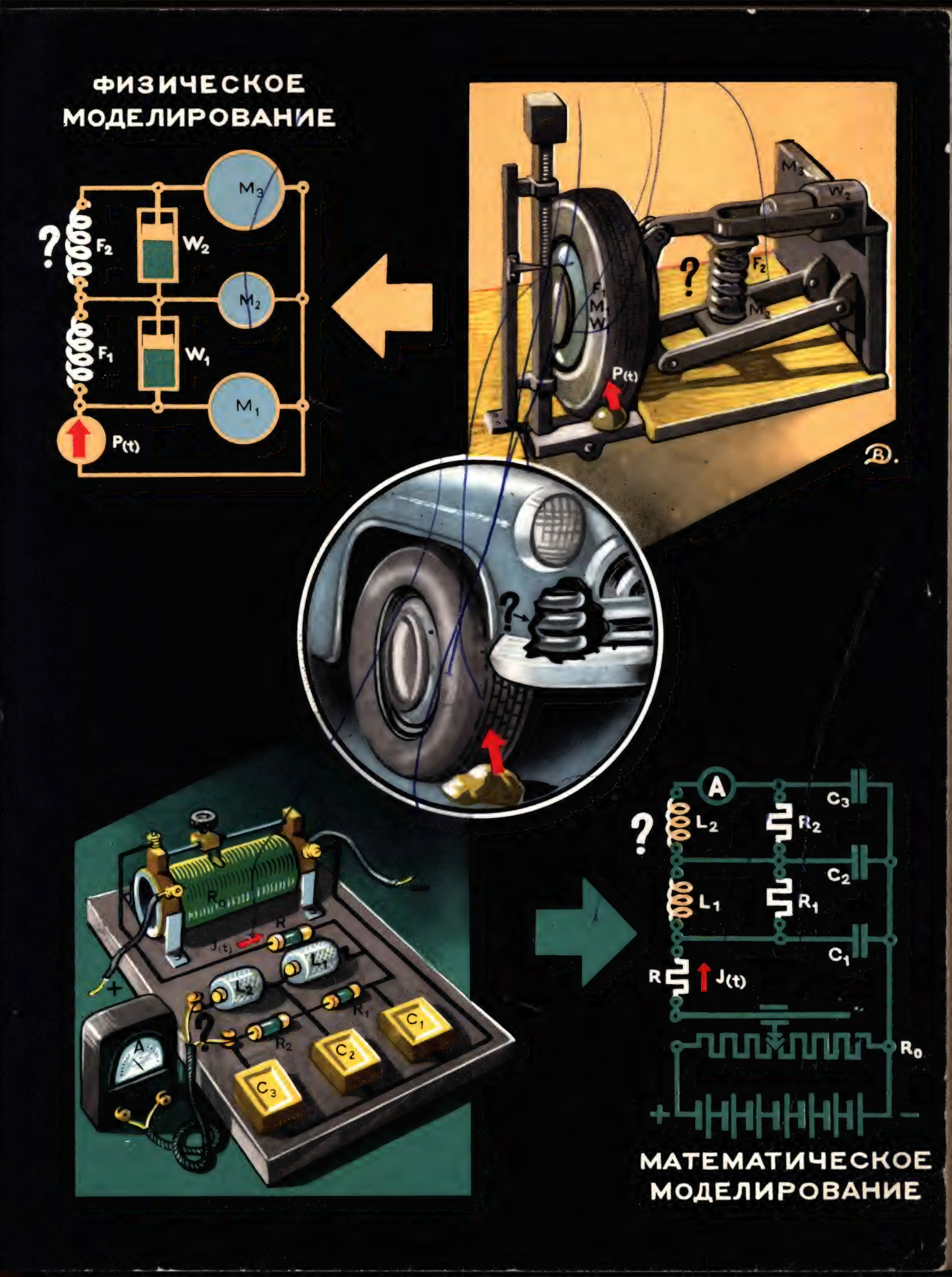
$$0+0=0,\ 0+1=1,\ 1+0=1,\ 1+1=10.$$

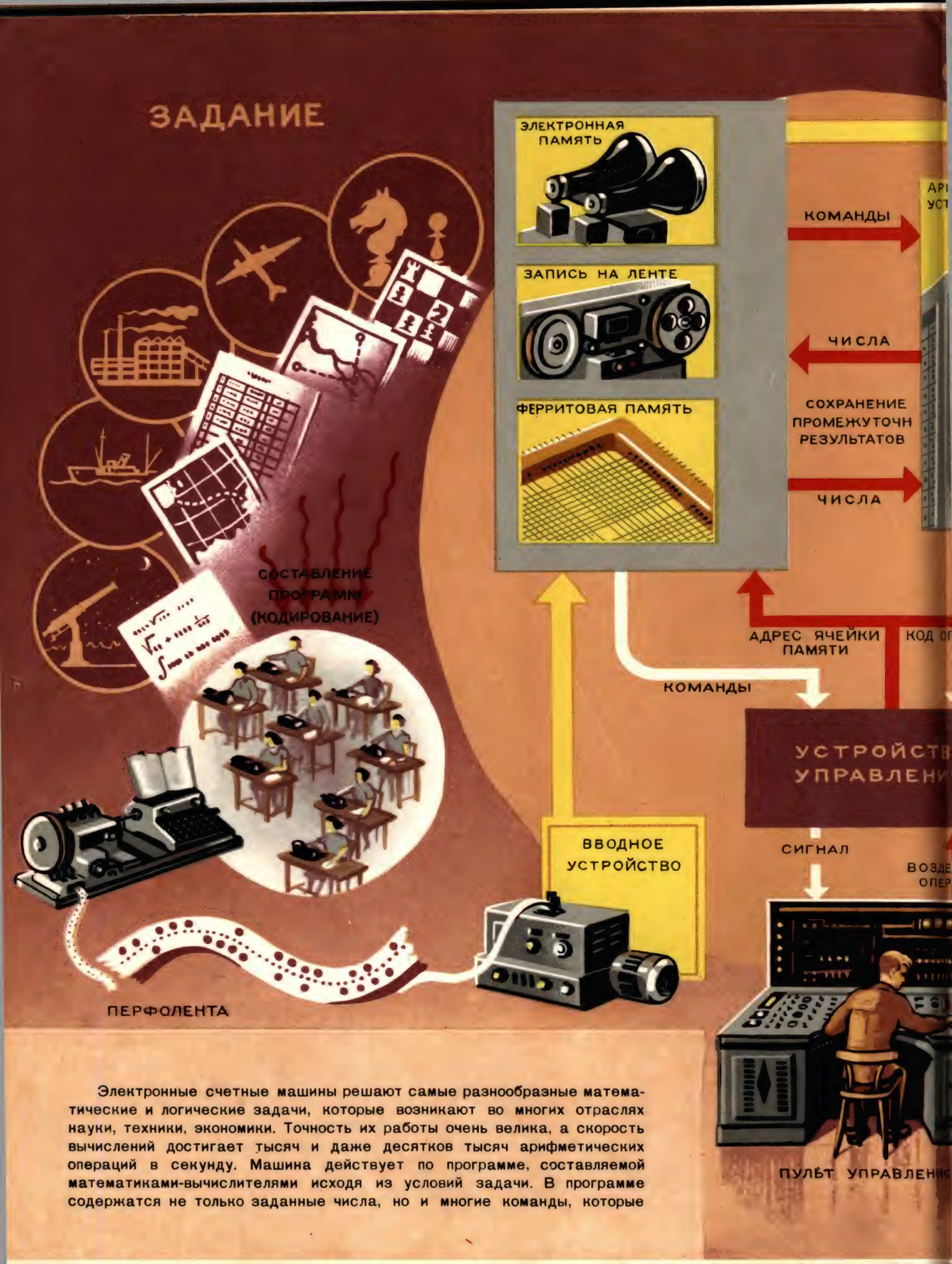
Не удивляйтесь последнему из этих правил: здесь 10—это не десять, а двоичное изображение числа 2.

Попробуем применить на практике эти правила и сложим два небольших числа. Пусть это будут 6 и 7. Напишем в столбец слагаемые в их десятичном и двоичном виде:

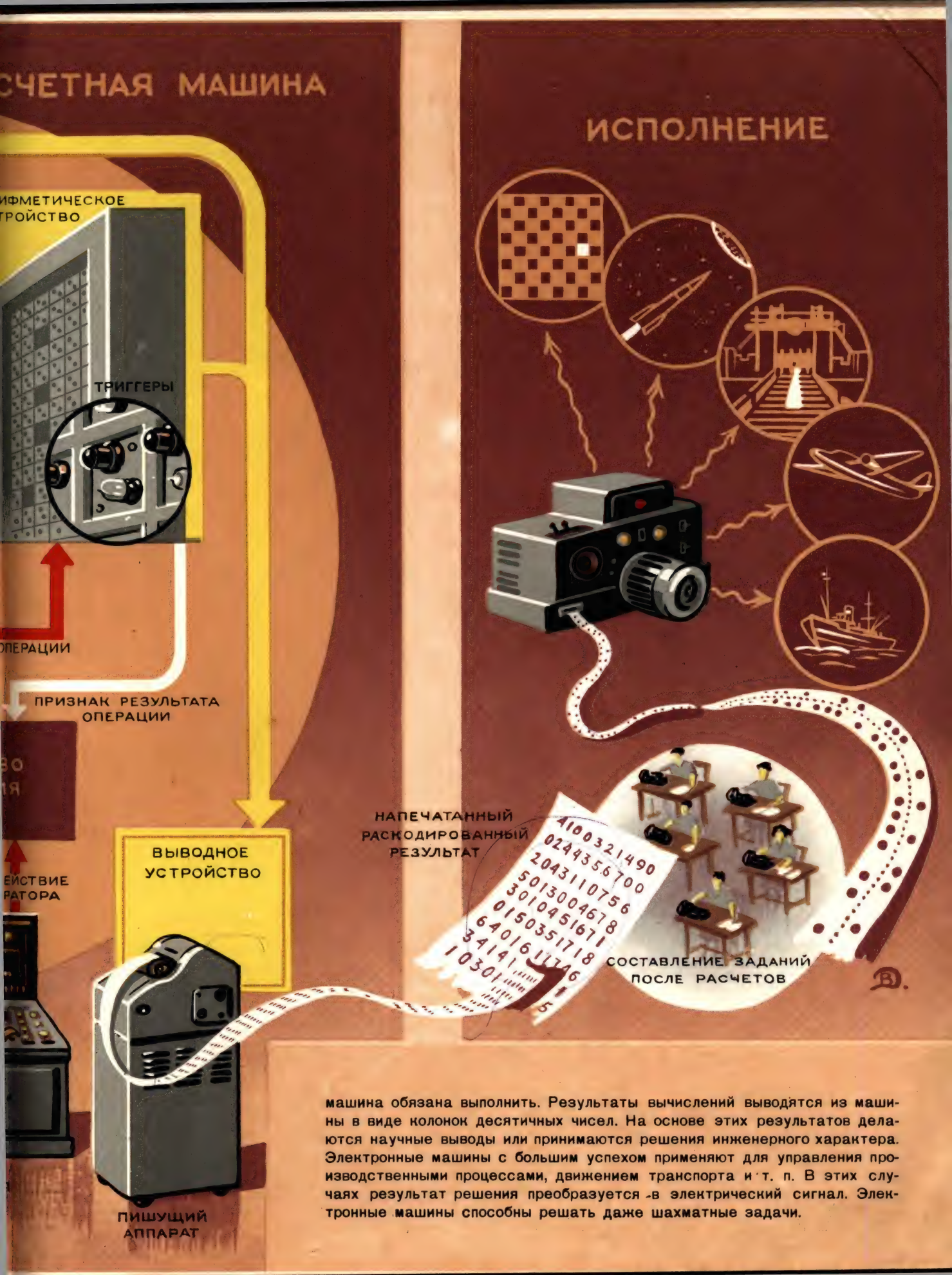
$$6=110$$
$$7=111$$

Таблица 1. Как сожмется пружина, если под колесо автомобиля попадет камень? Ответ на этот вопрос может дать физическая модель, состоящая также из пружины, грузов и т. д., или математическая модель, которая представляет собой электрическую цепь из катушек самоиндукции, конденсаторов, реостатов и т. д.
Таблица 2 показывает, как и в какой последовательности работает электронная счетная машина.


ФИЗИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ
M3
W2
F2
M2
F1
W1
M1
P(t)
?
M3
W2
F2
M2
F1
M1
W1
P(t)
?
?
A
C3
L2
R2
C2
L1
R1
C1
R
J(t)
R0
+
−
R
J(t)
L2
R1
R2
C1
C2
C3
A
?
МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ



Электронные счетные машины решают самые разнообразные математические и логические задачи, которые возникают во многих отраслях науки, техники, экономики. Точность их работы очень велика, а скорость вычислений достигает тысяч и даже десятков тысяч арифметических операций в секунду. Машина действует по программе, составляемой математиками-вычислителями исходя из условий задачи. В программе содержатся не только заданные числа, но и многие команды, которые



машина обязана выполнить. Результаты вычислений выводятся из машины в виде колонок десятичных чисел. На основе этих результатов делаются научные выводы или принимаются решения инженерного характера. Электронные машины с большим успехом применяют для управления производственными процессами, движением транспорта и т. п. В этих случаях результат решения преобразуется в электрический сигнал. Электронные машины способны решать даже шахматные задачи.

Спутник в полете
СЕГОДНЯ НА 15 ЧАСОВ ТРЕТИЙ СОВЕТСКИЙ СПУТНИК СОВЕРШИЛ 14 ОБОРОТОВ ВОКРУГ ЗЕМЛИ. НАД МОСКВОЙ СЕГОДНЯ ПЕРВЫЙ РАЗ ОН ПРОХОДИЛ В 12 ЧАСОВ 39 МИНУТ И ВТОРОЙ РАЗ ПОЯВИТСЯ В 18 ЧАСОВ 08 МИНУТ.
014670180
34567102
02301401
13456432

Теперь станем поочередно складывать члены правого столбца:

от сложения членов правого ряда получим	1
от сложения членов среднего ряда получим	10
от сложения членов левого ряда получим	10
Итак:	13 = 1101

Вот мы и получили ответ в уже знакомом нам виде.

Ну а двоичное умножение? Оно тоже очень просто, и вся двоичная таблица умножения умещается в одной строке. Вот она:

$$0\times0=0,\ 0\times1=0,\ 1\times0=0,\ 1\times1=1.$$

Перемножим для примера в двоичной системе два небольших числа. Пусть это будут 4 и 3. Производя умножение, мы должны соблюдать правила обычной арифметики:

$$\begin{array}{r} \times\begin{array}{r}4=100\\3=\ 11\end{array}\\ \hline 100\\ 100\\ \hline 1100 \end{array}$$

от умножения на младший разряд множителя.
от умножения на второй разряд множителя.
Теперь сложим оба числа по правилам двоичного сложения и получим:

Если мы возвратимся к таблице двоичных чисел, то увидим, что 1100 в двоичной системе и есть изображение числа 12. Значит, умножение произведено правильно.

Присмотримся к двум строчкам, где мы записали результаты умножения на единицы. Оказывается, при умножении происходит простой сдвиг множимого.

Если мы умножали на единицу во втором разряде, то множимое сдвигается так, что его правый край попадает также во второй разряд. Умножение на нуль фактически не дает результата.

Поэтому машина, производя умножение, сдвигает множимое столько раз, сколько это нужно, а потом складывает все результаты. Итак, сдвиг и сложение — вот и все, что требуется для умножения.

Двоичное вычитание также может быть сведено к сложению преобразованных кодов, а деление — к их сложению и сдвигу.

По ряду причин арифметические действия в цифровых машинах предпочитают выполнять над числами меньше единицы, т. е. с правильными дробями. При создании машины конструкторы учитывают это обстоятельство. А перед решением задачи все исходные числа преобразуют в дроби, умноженные на некоторые множители, с которыми можно совершать действия независимо от операции с самими дробями.

В десятичной системе это выглядело бы достаточно привычно. Пусть, например, нас попросили сложить числа 538 и 17 в форме правильных дробей. Мы сразу написали бы $0{,}538\times10^3+0{,}017\cdot10^3$, сложили бы дроби и только в конце расчета, вспомнив о множителе 10^3, приписали бы его к результату.

Как же получить любое число в виде двоичной дроби и дополнительного двоичного множителя? Сначала полезно вспомнить, что

в десятичной системе	в двоичной системе
0	0
$1=2^0$	1
$2=2^1$	10
$4=2^2$	100
$8=2^3$	1000 и т. д.

А теперь нетрудно понять и такую таблицу:

0	0
$1=2^0$	1
$\frac{1}{2}=2^{-1}$	0,1
$\frac{1}{4}=2^{-2}$	0,01
$\frac{1}{8}=2^{-3}$	0,001
$\frac{1}{16}=2^{-4}$	0,0001 и т. д.

Ни в коем случае нельзя забывать, что дроби, изображенные в правом столбце, двоичные, а не десятичные. Поэтому дробь 0,001 — это не одна тысячная, а двоичное изображение простой дроби $\frac{1}{8}$.

Таблица 3. Наблюдатели фиксируют положение спутника или ракеты на небесной сфере и передают полученные данные в вычислительный центр. Туда же поступают радиосигналы, посылаемые спутником или ракетой. Электронная счетная машина с большой быстротой рассчитывает орбиту, по которой спутник или ракета будут двигаться дальше. Эта же машина обрабатывает показания измерительной аппаратуры, которую несет в себе космический аппарат.

С помощью приведенных таблиц мы можем изображать в двоичной системе различные простые дроби, у которых знаменатель представляет собой степень числа 2. Например, дробь $\frac{3}{8}$ примет такой вид: 0,011. И это нетрудно понять. Ведь $\frac{3}{8}=\frac{1}{8}\cdot 3$, но $\frac{1}{8}$ изображается как 0,001, а 3 в двоичной системе имеет вид 11. Умножение 0,001 на 11 и дает 0,011.

Теперь мы без особого труда с определенной точностью сможем изобразить любое число в виде двоичной дроби и некоторого, также двоичного, множителя. Пусть это будет число 27. Составим его из двоек в различных степенях:

$$27 = 16 + 8 + 2 + 1 = (2^4 + 2^3 + 2^1 + 2^0).$$

Разделим обе части равенства на ближайшую бóльшую, чем число 27, степень двойки. Это будет число $32=2^5$ (если бы мы разделили на 2^4, то искомая дробь получилась бы неправильной). Итак, делим:

$$\frac{27}{32}=\frac{16+8+2+1}{32},$$

или

$$\frac{27}{32}=\frac{1}{2}+\frac{1}{4}+\frac{1}{16}+\frac{1}{32}.$$

Умножим теперь обе части равенства на 32, чтобы снова выделить интересующее нас число 27:

$$27 = \left(\frac{1}{2}+\frac{1}{4}+\frac{1}{16}+\frac{1}{32}\right)\cdot 32.$$

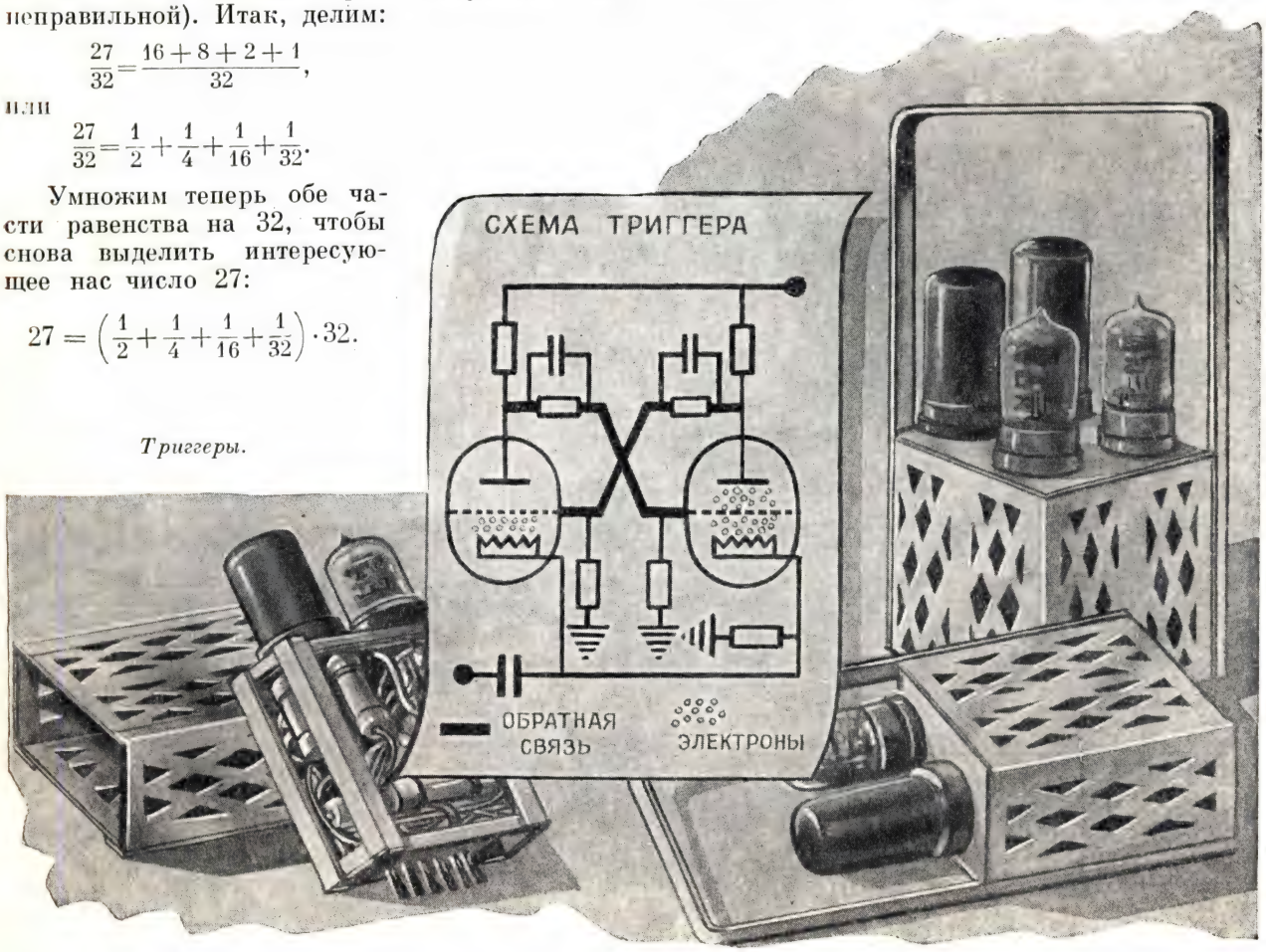
На основании таблицы двоичных дробей мы имеем право написать:

в десятичной системе	в двоичной системе
$\frac{1}{2}$	0,1
$\frac{1}{4}$	0,01
$\frac{1}{16}$	0,0001
$\frac{1}{32}$	0,00001

Сложив строчки правого столбца, мы получим 0,11011. Осталось закодировать множитель 32. Вспомним, что $32=2^5$. Но в двоичной системе 2 изображается с помощью единицы и нуля как 10, а 5 имеет вид 101.

Теперь мы можем окончательно записать десятичное число 27 с помощью двоичной дроби и двоичного множителя:

$$27 = 0{,}11011\cdot 10^{101}.$$



Триггеры.

Правая часть этого равенства представляет собой сочетание только нулей и единиц. Правильную дробь типа 0,11011 математики называют мантиссой числа, а показатель степени двойки, который в нашем примере имеет вид 101,— его порядком. Подобной обработке подвергаются все исходные числа прежде, чем машина начнет считать.

В результате наших занятий двоичной арифметикой мы пришли к очень важному и интересному выводу: все арифметические действия в машине сводятся к сложению и сдвигу чисел, состоящих из единиц и нулей.

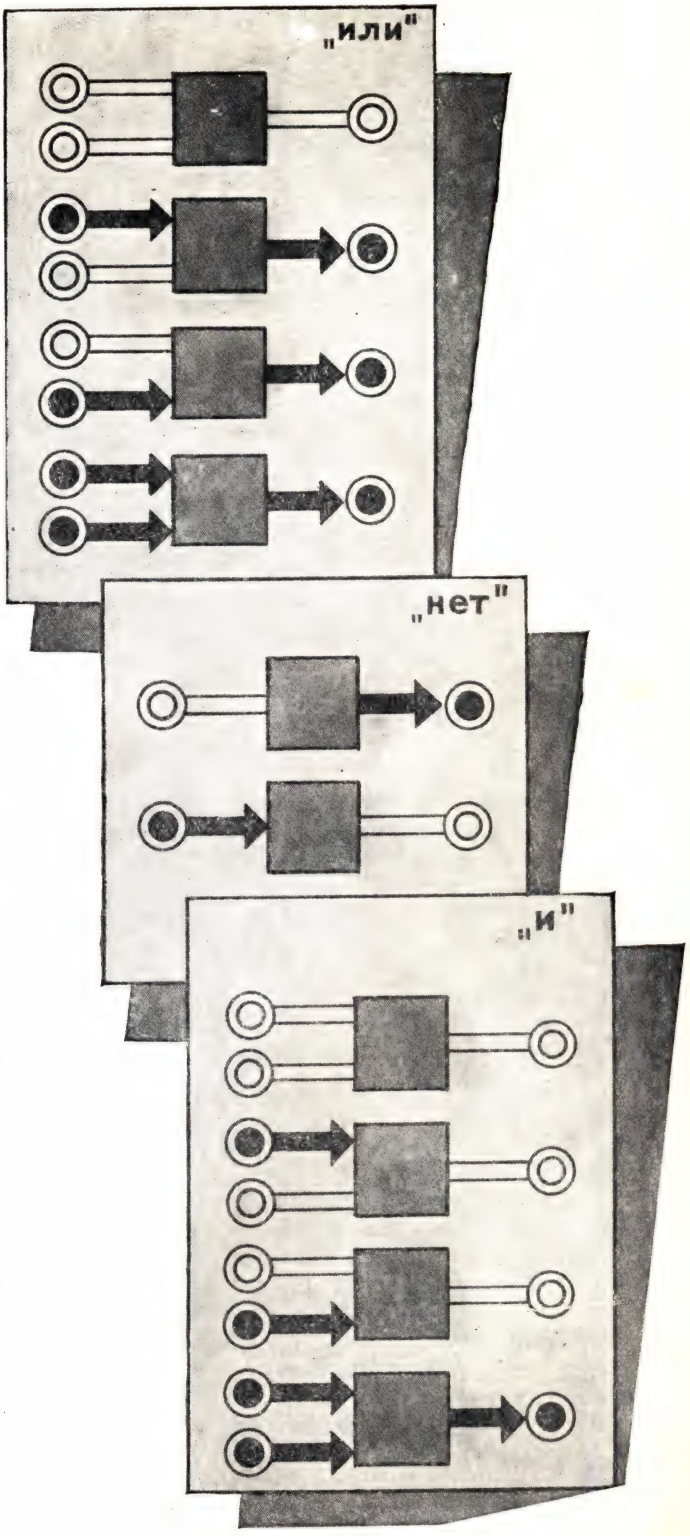
Но машина способна выполнять не только четыре действия арифметики. В математике уже давно известны численные способы выполнения более сложных действий: извлечения корней, логарифмирования, вычисления тригонометрических величин и др. Это означает, что любое сложное действие приближенно заменяется сложением, вычитанием, умножением и делением по определенным правилам, а результат может быть получен с очень большой точностью, несмотря на то что он является приближенным.

Ученые умеют сводить к простым арифметическим действиям многие очень сложные задачи высшей математики. Машина действует в десятки тысяч раз быстрее, чем человек, и ей под силу даже такие задачи, решать которые до ее изобретения люди вообще не могли, потому что они требовали огромной затраты времени.

«АНАТОМИЯ» ЦИФРОВОЙ МАШИНЫ

Итак, на электронное реле, или триггер, в машине возлагаются ответственные обязанности. Цепочки таких реле (регистры) с огромной скоростью накапливают и сохраняют многоразрядные двоичные числа. Но одних реле для выполнения всех нужных действий недостаточно. Есть в машине очень важные устройства, называющиеся логическими схемами. Состоят эти схемы из обычных радиодеталей, и часто в них даже не бывает электронных ламп.

Логические ячейки разных типов называют, в соответствии с их обязанностями, словами «нет», «и», «или». В каждой такой ячейке есть одна или несколько цепей, через которые подаются импульсы. Это — «вход» ячейки. Ячейка имеет также и «выход» — цепь, которая посылает в другие части машины образованный ячейкой сигнал.



Логические ячейки разных типов.

Перфолента и перфокарта.

Если в схему «нет» поступит импульс, то сигнала на выходе не возникнет. И, наоборот, если на входе не будет сигнала, схема вырабатывает импульс. Схема «и» вырабатывает сигнал, только когда импульсы появляются одновременно на всех ее входах. Наконец, на выходе схемы «или» сигнал возникнет при поступлении импульса либо на один из входов, либо на несколько, либо на все сразу. Часто применяются ячейки «и» и «или» с двумя входами.

Из многочисленных электронных реле и логических ячеек составляется арифметический узел машины — своего рода электронный арифмометр, который и выполняет все действия с импульсными кодами чисел по правилам двоичной арифметики. Какова же точность, с которой работает арифметический узел и машина в целом? Количество разрядов двоичных чисел, с которыми оперирует машина, может составлять от 30 до 40. Это соответствует в среднем 10 миллиардам в десятичной системе. Значит, машина считает с огромной точностью — до одной десятимиллиардной и даже выше.

Кроме арифметического узла, в электронной счетной машине есть еще четыре очень важных устройства, без которых ее работа была бы немыслимой. Прежде всего это вводное устройство, дающее возможность перейти от языка букв и цифр к языку импульсов, т. е. ввести задачу в машину.

Прежде чем ввести задачу в машину, математики совершают большую работу, составляя программу решения задачи. Это не просто перечень всех исходных чисел, но и список команд, которые машина обязана выполнить. Затем программу переносят с помощью специального прибора — перфоратора на перфоленту. И не только числа, но и команды впоследствии «оживут» в машине в виде электрических «нулей» и «единиц».

Оператор, работающий на перфораторе, делает примерно то же, что и машинистка: глядя на список чисел и команд, он стучит по клавиатуре аппарата. А сбоку из перфоратора выползает готовая перфолента, где условия решения задачи обозначены сочетаниями круглых отверстий.

Потом ленту вкладывают в вводное устройство машины. Нажали кнопку, и лента, увлекаемая моторчиком, начинает двигаться между электрической лампочкой и фотоэлементами. Через несколько десятков секунд лента «считана» и вся задача в виде электрических импульсов, выработанных фотоэлементами, ушла в запоминающее устройство — «память». Это — третья, исключительно ответственная часть машины.

Исходные условия любой задачи состоят из чисел и команд. В ходе решения задачи могут получаться новые числа, которые понадобятся впоследствии. Машине все время приходится сохранять их. Для этого и необходима «память».

Запоминающие устройства в машине могут быть двух видов. Первым и наиболее важным является внутреннее, или оперативное, запоминающее устройство.

В современной машине оно может сберегать 2000—4000 чисел. Но творческая мысль конструкторов упорно стремится увеличить емкость «памяти» до 10—20 тысяч чисел. Ведь от этого зависит способность машины решать особо сложные задачи.

При решении задач оперативной памяти приходится непрерывно работать, поэтому она должна быть быстродействующей.

Еще недавно в качестве внутренней памяти наиболее широко использовались вращающиеся магнитные барабаны и электронно-лучевые трубки. В барабане числа сохраняют, намагничивая мельчайшие частички его поверхности, а в электронных трубках — в виде электрических зарядов на специальном непроводящем ток слое, который наносится на экран трубки. Любое запоминающее устройство снабжают также усилителями и управляющими схемами.

В последние годы была изобретена ферритовая «память», в которой числа сохраняются в виде магнитных состояний миниатюрных магнитиков.

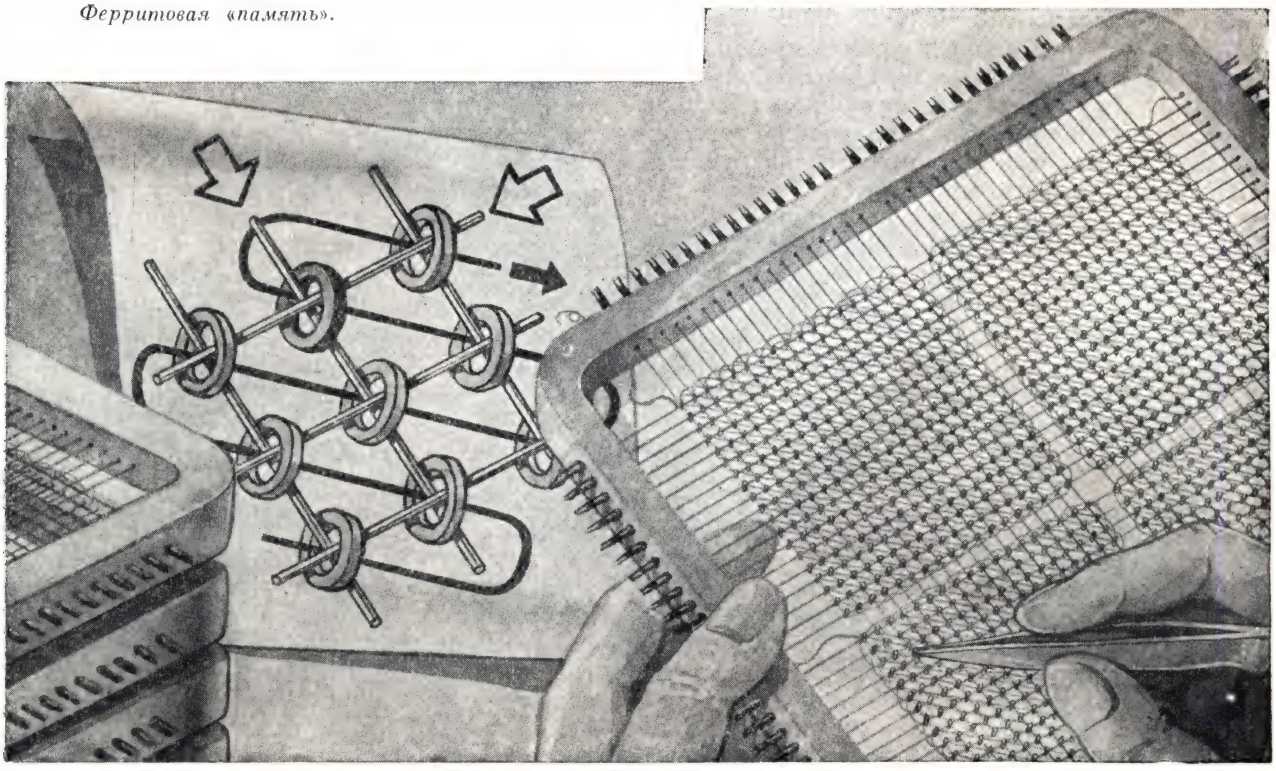
Один слой ферритовой «памяти» — это своеобразная ткань из множества проволок, на пересечениях которых расположены ферритовые сердечники — колечки, изготовленные из специального магнитного порошка. Такая «память» очень надежна, обладает способностью быстро действовать и со временем позволит сохранять многие тысячи чисел.

Второй вид «памяти» — внешнее или долговременное запоминающее устройство. В нем хранятся числовые коды, которые требуются при работе машины достаточно редко. Более всего удобны для хранения огромного количества двоичных кодов магнитные ленты — те самые, которые применяются в магнитофонах. На них можно сохранять многие сотни тысяч чисел.

Следующим очень важным узлом машины служит управляющее устройство. Без него машина не могла бы работать. Ведь всеми операциями в ней необходимо управлять, и управлять без вмешательства человека. Как же это устройство может разумно управлять всеми частями такого сложного аппарата, как электронная цифровая машина?

Люди заранее заботятся о том, чтобы и управляющее устройство и машина в целом действовали согласованно. Для этого, как мы говорили, еще до начала вычислений в машину посылают не только все исходные числа, но и необходимые команды. Каждая команда имеет примерно такой вид: «Взять числа *A* и *B* из таких-то ячеек «памяти», сделать над ними такое-то действие, результат направить в такую-то ячейку «памяти». Одна из следующих

Ферритовая «память».



команд использует полученный результат и производит над ним новую операцию, и т. д. Команды поступают в машину в виде двоичных чисел.

Управляющий узел расшифровывает каждую такую команду и, подчиняясь ей, создает пути для импульсов только в нужном направлении. Состоит он из уже знакомых нам электронных реле, счетчиков импульсов и логических ячеек.

Но вот задача решена машиной, и в «памяти» готов окончательный ответ. Тогда вступает в действие пятый узел машины — выводное устройство, важнейшей частью которого является печатающий аппарат. Это он дает нам ответ в виде таблиц из букв и десятичных чисел.

ЗАМЕЧАТЕЛЬНЫЕ СВОЙСТВА ЦИФРОВОЙ МАШИНЫ

Нельзя не сказать о двух чрезвычайно важных особенностях цифровых машин, которые позволяют образно называть эти устройства «думающими». Нам теперь известно, что команды, управляющие машиной, имеют вид двоичных чисел. Оказывается, можно программу работы составить так, что машина будет не только подчиняться командам, но и производить над ними... арифметические действия. В результате этих действий машина получит новую команду, которую она сама же потом и выполнит. Значит, машина способна сама вырабатывать себе приказы на будущее. Каким образом это происходит?

Машина без особого труда может сравнивать два числа. Это не выходит за рамки простой арифметики. Но из способности сравнивать вытекает второе удивительное свойство машины. Оказывается, машина может переходить от одного способа расчета к другому, если сравнение двух чисел покажет, что такой переход нужно сделать. При этом арифметическое устройство посылает сигнал в узел управления, который изменяет команду и заставляет машину считать по-новому. Вот эти особенности цифровых машин придают их работе исключительную гибкость, делают их универсальными, способными решать самые разнообразные задачи. Конечно, такое «разумное» поведение машины заранее определяется программой.

Итак, цифровая машина обладает удивительной способностью выбирать правильные пути для своей работы, вырабатывать для себя новые приказы и перестраиваться в ходе вычислений. Как видим, работа машины, снабженной программой, в какой-то степени напоминает деятельность человеческого мозга.

Мы уже упоминали вскользь об огромной скорости вычислений на электронных машинах. Теперь мы снова вернемся к этому важному их свойству. Средняя скорость работы современных машин — 5—8 тысяч действий в... секунду. Но сейчас идет борьба за еще более высокие скорости. Уже существуют машины, способные выполнять за секунду 30—60 тысяч действий. И недалеко то время, когда скорость вычислений на некоторых новых машинах перевалит за 100 тысяч операций в секунду. Однако в массовом масштабе едва ли стоит стремиться к этому, так как увеличение скорости обходится недешево. В обычных машинах вполне можно довольствоваться 2 или 3 тысячами действий в секунду.

Но что значат эти тысячи? Сейчас мы вправе утверждать, что цифровая машина работает в 10 тысяч раз быстрее, чем человек с арифмометром. Значит, всю работу счетовода за день машина может выполнить за... 3 секунды. А в течение одного дня машина справляется с расчетом зарплаты для 25—30 тысяч человек, работающих на большом предприятии.

ЦИФРОВАЯ МАШИНА РАБОТАЕТ

Возможности применения цифровых машин неисчерпаемы. Машины уже помогли проверить многие исключительно трудоемкие астрономические расчеты, которые велись раньше на протяжении десятилетий и даже веков. Требуется, например, всего 500 часов — немногим более двадцати суток, чтобы машина на четверть века вперед определила все движения всех планет солнечной системы. А ведь, кроме больших планет, науке известно еще несколько тысяч малых — астероидов.

Мы являемся современниками замечательного начала освоения Космоса. И в этом деле на электронные цифровые машины возложат великие и разнообразные задачи. Недавно советскими учеными был произведен запуск трех искусственных спутников Земли. Читая в газете сообщения о траектории полета спутника, мы уверены, что он появится над нашей головой в точно назначенное время. Кто же сумел так точно предсказать полет маленькой искусственной луны? Конечно, цифровая машина.

Машины становятся незаменимыми помощниками конструкторов и проектировщиков. В поисках правильного решения инженерам часто приходится в течение многих месяцев и даже лет рассчитывать десятки вариантов какой-либо конструкции или сооружения. Машина же в несколько минут или часов может рассчитать все эти варианты. А если в программу ее работы «заложить» числовую оценку, общую для всех вариантов, то машина сама выберет наилучший из них.

Раньше при конструировании самолета десять человек в течение двух с половиной месяцев рассчитывали колебания его частей. А машина с этой работой справляется за ... полчаса.

Цифровые машины помогают определять затраты денег и материалов при строительстве, решают сложнейшие задачи, возникающие при изучении атомного ядра, и даже предсказывают погоду.

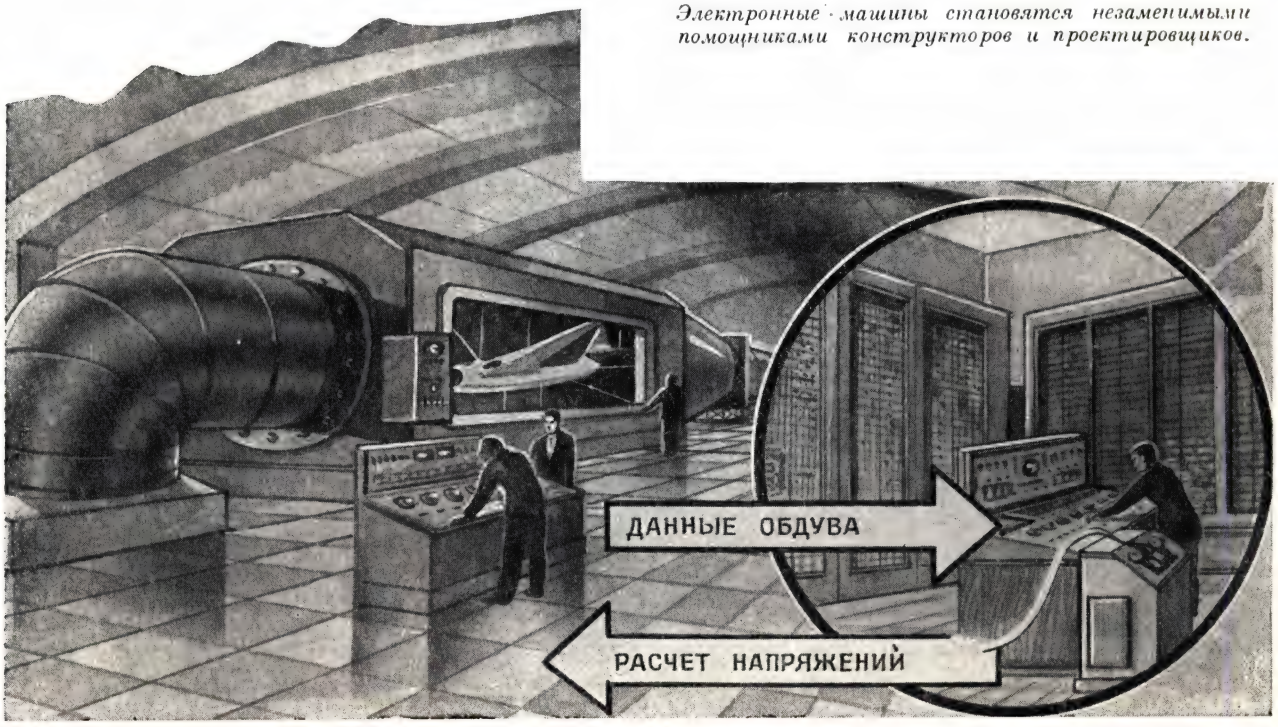
Но это далеко не все. Ученые и инженеры убедительно доказали, что цифровой машине можно поручать вообще любую умственную работу, протекающую по строго определенным правилам. Необходимо лишь найти эти правила, выразить их в виде математической таблицы — а л г о р и т м а и ввести в программу. И тогда цифровые машины перестают быть просто вычислительными устройствами. Они начинают решать... логические задачи. Это их интереснейшее свойство основано на законах математической логики.

Разнообразны логические задачи, решение которых поручают теперь цифровым машинам. Здесь и составление расписаний движения поездов, и управление движением поездов на больших узловых станциях, и составление графиков прибытия и отлета самолетов в аэропортах, и сортировка книг по картотеке в крупных библиотеках, и многое другое.

Пожалуй, наиболее удивительной из логических задач является автоматический перевод текста с одного языка на другой. Непосвященному человеку трудно поверить, что машина может быть переводчиком. И все же это реальный факт.

В январе 1954 г. в Нью-Йорке состоялась первая публичная демонстрация машинного перевода с русского языка на английский, а в конце 1955 г. в Москве на машине БЭСМ был успешно проведен первый из целой серии опыт автоматического перевода с английского на русский.

Электронные машины становятся незаменимыми помощниками конструкторов и проектировщиков.



Машинный перевод стал возможным потому, что языковедам удалось установить те формальные правила, которые связывают два разных языка. А от этих правил уже было нетрудно перейти к программе. Но со словами и буквами машина не умеет обращаться. Поэтому для буквенного текста применяют цифровую двоичную форму записи, так же как это делается в телеграфии, где обычно пользуются кодом Бодо.

Вот как кодируются первые буквы латинского алфавита: *a*—16, *b*—06, *c*—22, *d*—30, и т. д. В цифровую форму можно облечь и буквы русской азбуки, причем буквы, произносимые одинаково на разных языках, записываются одним цифровым кодом.

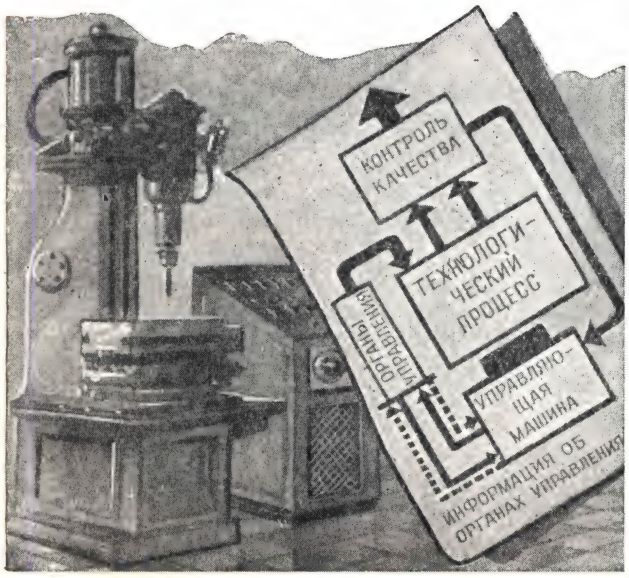
Для английского слова «bad» — «плохой» мы получим такую числовую запись: 06 16 30. Но и с десятичными числами машина не умеет оперировать. Поэтому в «памяти» машины это число попадает в чисто двоичном виде:

0000 0110 0001 0110 0011 0000.

Здесь каждая четверка из нулей и единиц изображает один десятичный знак.

Такой же неудобный для чтения, но необходимый для перевода двоичный облик принимают в машине и другие слова.

Языковеды и математики-программисты заранее снабжают «память» машины словарем, содержащим русскую и иностранную части. Русские и иностранные слова одинакового значения помещаются в ячейках под одним и тем же номером. Машина при переводе должна сравнивать цифровые коды чисел и отыскивать одинаковые. Языковеды «научили» машину справляться и с такими «неприятностями», как грамматические правила, склонения, спряжения и т. д.



Электронная машина управляет работой станка.

Современные машины переводят лишь очень простые тексты, и то не быстрее, чем человек. Но борьба за усовершенствование машинного перевода продолжается. Ученые и инженеры помышляют о создании специальных машин-переводчиков. И, несомненно, автоматический перевод со временем завоюет всеобщее признание. Однако нельзя чрезмерно увлекаться этим: машина никогда не сможет заменить человека в таком деле, как перевод художественной литературы.

Цифровые машины могут играть в такие логические игры, как карты, домино и шахматы. Машине с успехом можно поручать также решение задач по экономике и планированию, по снабжению и даже по военной стратегии. Наконец, перед электронными цифровыми машинами открывается еще одно необъятное поле деятельности — на производстве.

Машине, оснащенной измерительными и исполнительными устройствами, доверяют теперь управление станками, аппаратами, конвейерами и даже целыми предприятиями. Человеку остается только контролировать работу такой совершенной, «мыслящей» автоматики.

На одном заводе управляющую машину использовали в роли фрезеровщика. Деталь, которую раньше человек обрабатывал в течение 14 дней, электронный фрезеровщик изготовил за... 1 час. На другом заводе обработка одной точной детали занимала 3 недели. Эту же работу станок, управляемый цифровой машиной, выполняет за 2 часа.

В наши дни управляющая машина с безукоризненной точностью работает в качестве аэродромного диспетчера. Являясь «мозгом» сложнейшей автоматической системы, оснащенной радиолокаторами, она без помощи людей одновременно командует посадкой нескольких самолетов.

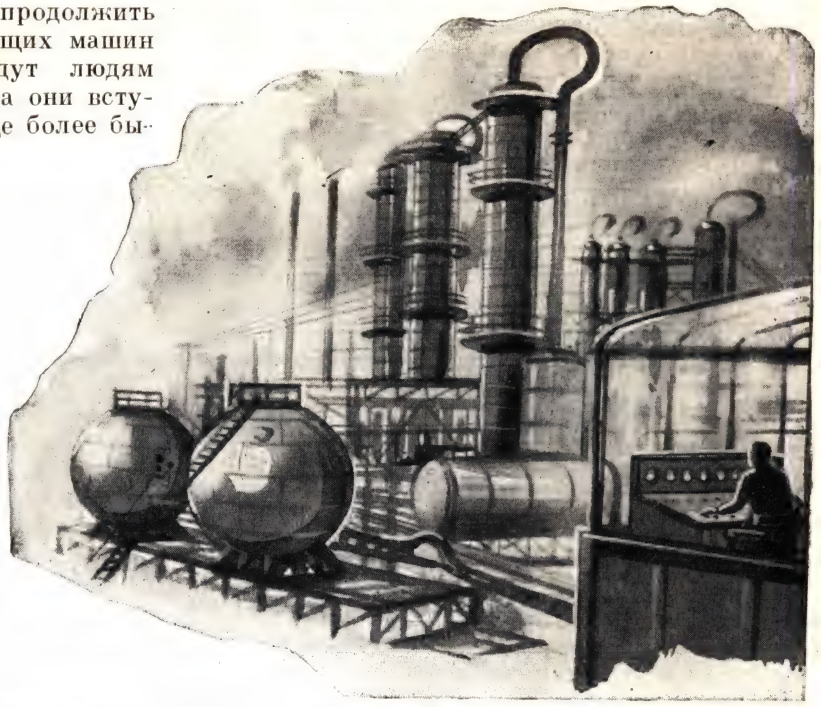
На нефтеперерабатывающем заводе, где «полновластным распорядителем» является тоже управляющая машина, мы вовсе не найдем людей. На заводе радиоаппаратуры, построенном по специальному проекту, также все делают автоматы, управляемые цифровыми устройствами. Здесь работают всего два человека. Они только наблюдают за исправностью автоматики.

Этот перечень можно было бы продолжить и дальше. А ведь эпоха управляющих машин только начинается. Что же дадут людям электронные счетные машины, когда они вступят в период «зрелости», станут еще более быстрыми и надежными? Здесь уже открывается большой простор фантазии.

Конструкторы упорно трудятся над улучшением качества электронных машин. Машины должны быть абсолютно надежными, занимать немного места и потреблять мало электроэнергии. От машин будущего потребуется также способность к саморемонту. Как видим, требования предъявляются очень серьезные. Поэтому вычислительная техника безотлагательно использует все те замечательные достижения физики, радиотехники, электроники, которые могут быть для нее полезными.

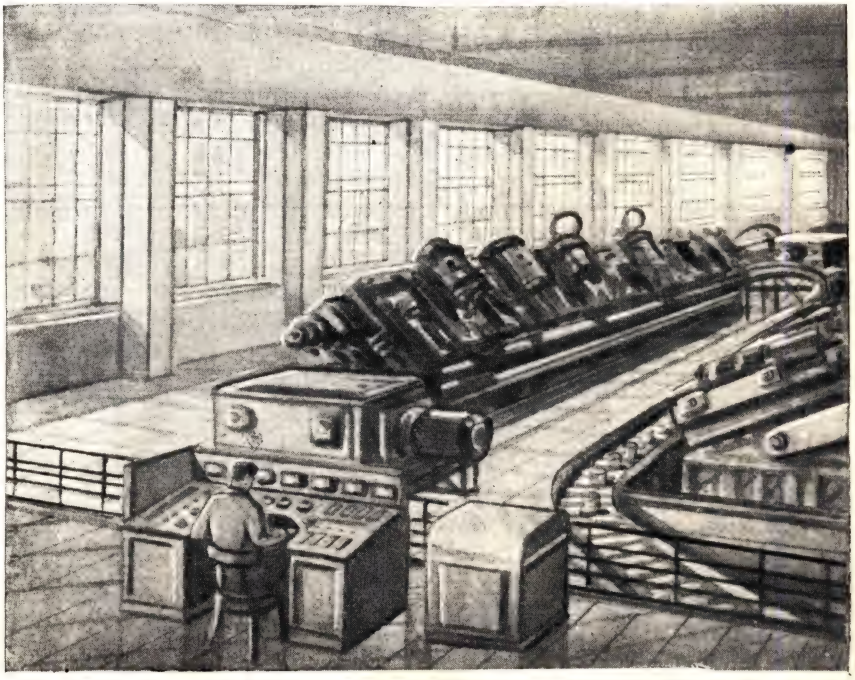
Уже теперь в машинах широко используются новейшие миниатюрные полупроводниковые и магнитные элементы. На предприятия, где создаются машины, пришла новая техника монтажа — техника «печатных» схем. Размеры универсальной счетной машины, собранной из новых элементов с использованием «печатного» монтажа, невелики. Она немногим больше обычного письменного стола. Машина не нуждается в охлаждении, а по надежности намного превосходит ламповые машины. Специализированные цифровые машины с полупроводниковыми элементами, особенно те, которые устанавливаются на самолетах, совсем небольшие по размерам. Одна из таких машин занимает столько же места, сколько и телевизор, а энергии потребляет в 2—3 раза меньше его.

Наш рассказ об электронных счетных машинах, об их замечательных свойствах был краток. И все же, прочитав его, вы, несомненно, почув-



Электронная машина заменяет труд большого количества людей на нефтеперерабатывающем заводе.

За конвейером нет рабочих: всю работу выполняет машина.



ствовали самое главное: применение электронных машин сулит гигантскую экономию труда чуть ли не во всех областях человеческой деятельности, и в первую очередь там, где создаются материальные ценности,— на производстве. Мы находимся на пороге новой промышленной эры: машины будут не только обрабатывать, изготовлять, машины также станут управлять производством.

Вот почему в решениях XXI съезда Коммунистической партии Советского Союза развитию электронной вычислительной техники в нашей стране уделено особое внимание. Производство счетных и математических машин будет стремительно развиваться. К концу семилетия оно возрастет в 4,5—4,7 раза по сравнению с 1958 г.

Состоявшийся в июне 1959 г. Пленум ЦК КПСС, посвященный вопросам ускорения технического прогресса, комплексной автоматизации и механизации промышленности и строительства, поставил задачу перехода от автоматизации отдельных операций к созданию полностью автоматизированных цехов и заводов. Эту задачу невозможно выполнить без самого широкого применения вычислительных и управляющих машин.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Начав с рассказа о самых простых вещах (двоичной арифметике, импульсах, импульсных схемах), мы закончили яркими примерами поразительных возможностей машины. Машина безукоризненно и быстро считает, машина переводит с одного языка на другой, машина играет в шахматы, машина управляет самолетом или станком. Мало того, машина может имитировать повадки и рефлексы живых существ; при помощи машины можно изучать сложнейшие процессы в мозгу человека; машина, решающая логическую задачу, способна накапливать опыт и обучаться.

Все это, наверное, вызовет у вас множество серьезных вопросов, самым важным из которых будет: мыслит ли машина? может ли машина работать совсем без программы?

Вопрос этот действительно серьезный. Ведь если это возможно, значит, машина полностью уподобляется мозгу. Но работает она неизмеримо быстрее и, по сути, безошибочнее, чем мозг человека. И не придется ли человеку уступить место машине, механизму, созданному руками самого человека?

Такие опасения напрасны. Машина не сможет устранить человека.

Сейчас многие ученые-математики ведут напряженную и кропотливую работу по упрощению программ для счетных машин, стремясь к тому, чтобы машина довольствовалась минимальным числом исходных команд, а все остальное делала бы сама. Ученые создали и так называемые программирующие программы. Благодаря им наиболее трудоемкая часть программирования задач возлагается на саму машину. Быть может, со временем удастся так упростить программы, что 99% всей «мыслительной» работы будет выполняться самой машиной. И все же первые и самые важные шаги машина всегда будет совершать по воле человека, по командам, которые он тем или иным способом введет в машину.

Как видим, машина не мыслит. Это не мозг, а аппарат, обрабатывающий сведения, которые посылаются в него человеком. Существуют и другие немаловажные различия между машиной и мозгом. Обо всем этом полезно каждому почитать и подумать.

Значит, машины, которые только образно можно называть «думающими», не угрожают людям.

Человеку не придется уступать место «умной и безжалостной» машине. Электронные счетные машины будут лишь быстрыми и надежными помощниками людей в труде, науке, быту, в строительстве нашего коммунистического завтра.

Фигуры и тела

ГЕОМЕТРИЯ ВОКРУГ НАС

Все мы привыкли к тем предметам, которые окружают нас, и часто не замечаем, сколько разнообразных геометрических фигур находится вокруг. А кое-кто, возможно, считает, что различные замысловатые линии или поверхности можно встретить только в книгах ученых-математиков и нигде больше.

Однако стоит внимательно осмотреться, и мы сразу обнаружим всевозможные геометрические фигуры. Оказывается, их очень много. Просто мы этого раньше не замечали.

Вот наша комната. Все ее стены, пол и потолок являются плоскостями (мы не будем обращать внимание на проемы окон и дверей), а сама комната имеет форму параллелепипеда (рис. 1).

Посмотрим на паркетный пол. Планки паркета — прямоугольники (рис. 2).

Пройдем в кухню или в ванную комнату. Плитки пола там часто бывают либо правильными шестиугольниками (рис. 3), либо восьмиугольниками, между которыми уложены небольше квадратики.

Но вернемся в комнату и посмотрим на мебель. Шкаф в своей основе — параллелепипед (рис. 4). Письменный стол — не что иное, как очень плоский параллелепипед, лежащий на двух других параллелепипедах — тумбочках,

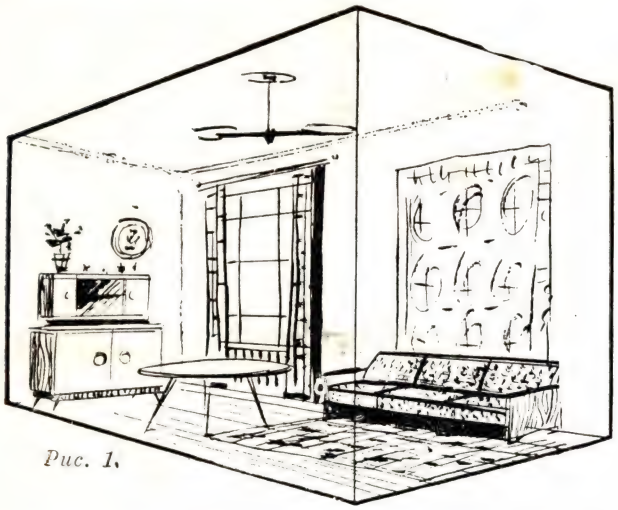


Рис. 1.

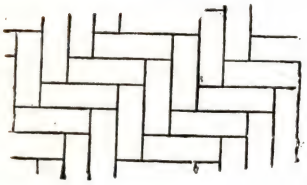


Рис. 2.

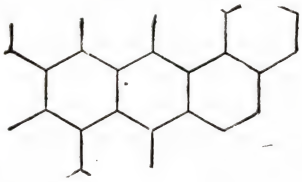


Рис. 3.

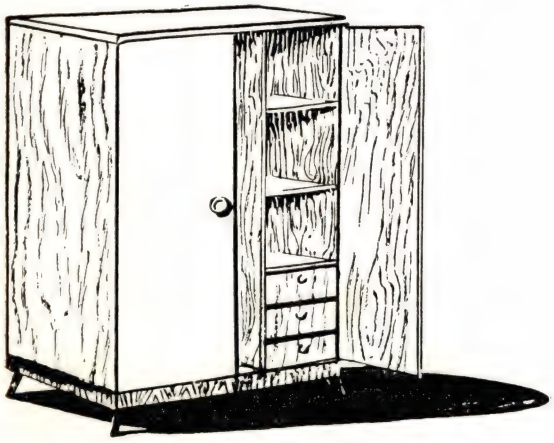


Рис. 4.

Рис. 5.

в которых размещаются ящики (рис. 5). На столике — лампа с абажуром (рис. 6). Этот абажур — конус.

Ведро представляет собой **усеченный конус**, у которого верхнее основание больше нижнего. Впрочем, ведро бывает и цилиндрической формы (рис. 7). Вообще цилиндров и конусов в доме очень много. Все прямые трубы (водопровод, паровое отопление, газопровод) — **цилиндры**. А там, где трубы изогнуты, образуются так называемые **каналовые**, или **трубчатые**, поверхности (рис. 8, *а* и *б*).

В буфете стоит чайная посуда. Вот граненый стакан с боковой поверхностью правильной **многогранной призмы**. А вот и блюдечко — снова усеченный конус (рис. 8, *в* и *г*). Тут же лежит воронка. Она состоит из двух усеченных конусов, которые переходят один в другой (рис. 8, *д*).

Нальем в стакан воду. Края ее поверхности образуют форму **круга**. Наклоним стакан так, чтобы вода не выливалась, и края водной поверхности станут **эллипсом** (рис. 8, *е*).

Выйдем на улицу. Перед нами — дома́. Если не обращать внимания на различные особенности их архитектурной отделки, можно сказать, что стены домов являются плоскостями. Две стены, встречаясь под углом, пересекаются по прямой линии. Дом в целом, с этой точки зрения, есть тело, образованное пересекающимися друг с другом плоскостями, т. е. **многогранник**. На рис. 9 и 10 изображены два таких дома-многогранника.

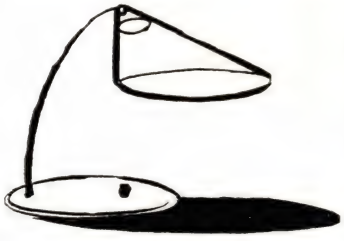


Рис. 6

Один из них представляет собой параллелепипед, на котором лежит трехгранная призма, другой состоит из нескольких параллелепипедов и призм, переходящих друг в друга.

Рис. 7.

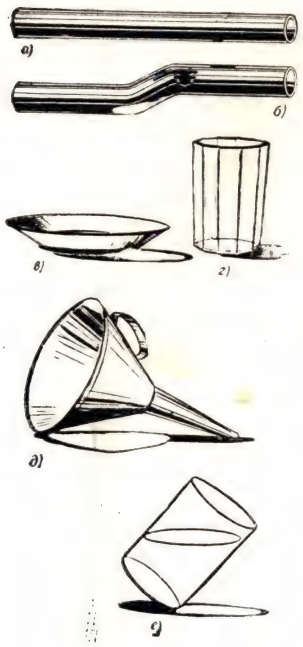


Рис. 8.

Многие жилые дома, дворцы, общественные здания украшены колоннами. Колонны в большинстве случаев — цилиндры, но могут иметь более сложную форму.

Кто был в Москве, знает, как красив Московский Кремль. Прекрасны его башни! Сколько интересных геометрических форм положено в их основу! Вот, например, Набатная башня (рис. 11). На высоком параллелепипеде стоит параллелепипед поменьше с проемами для окон, а еще выше воздвигнута четырехугольная усеченная пирамида. На ней расположены четыре арки, увенчанные в свою очередь восьмиугольной пирамидой. На берегу Москвы-реки возвышается Беклемишевская башня. Ее основание цилиндрической формы переходит в усеченную восьмиугольную пирамиду и завершается правильной восьмиугольной пирамидой.

По улице едут автомобили, трамваи, троллейбусы. Их колеса с геометрической точки зрения — круги. Мы настолько привыкли к этому, что даже не думаем об окружности как о кривой, которая помогла людям во много раз облегчить свой труд. А ведь было время, когда люди еще не знали колеса, когда тяжести волокли.

Рис. 10.

Посмотрим на автомобильные фары. Их внутренняя поверхность зеркальная. Конструкторы автомобилей знают, что свет должен выходить из фар пучком параллельных лучей: тогда сила света будет слабее всего уменьшаться с увеличением расстояния. А чтобы зеркало фар отражало лучи параллельным пучком, зеркалу нужно придать форму п а р а б о л о и д а в р а щ е н и я (рис. 12, сверху), внутри которого в определенной точке (в фокусе) находится лампочка. Параболоид вращения — это поверхность, которая образуется при вращении параболы вокруг оси.

У некоторых марок автомобилей фары находятся внутри капота и снаружи виднеется только стекло. У других же весь корпус фары выступает наружу и ясно видно, что она параболической формы.

Параболоид вращения служит отражающим зеркалом и у прожекторов (рис. 12, внизу), которые посылают в небо свои мощные лучи.

Перед нами мост. Арки мостов бывают

Рис. 9.

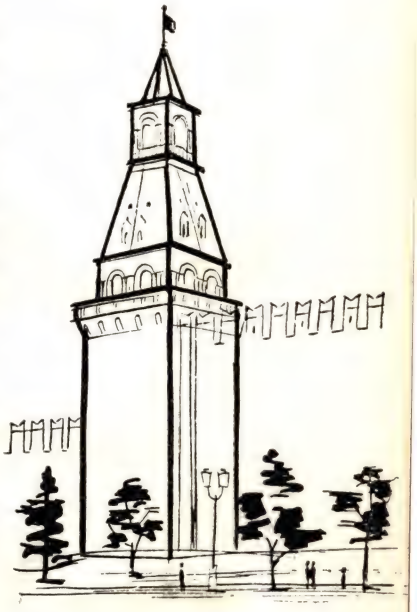


Рис. 11.

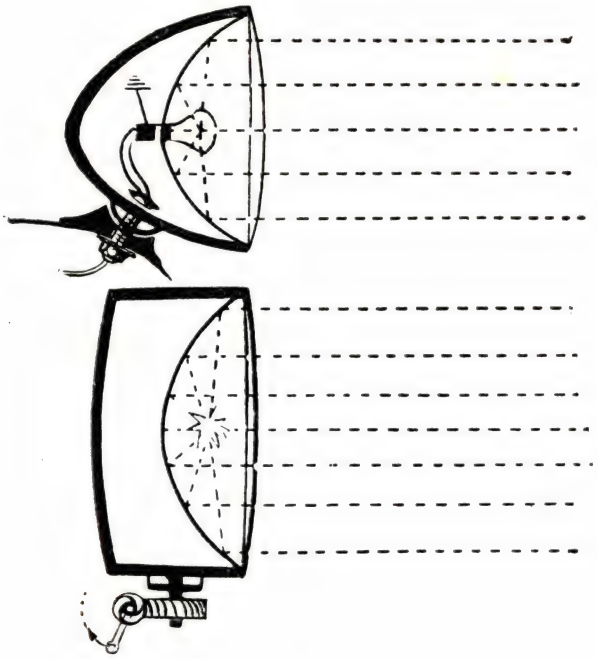


Рис. 12.

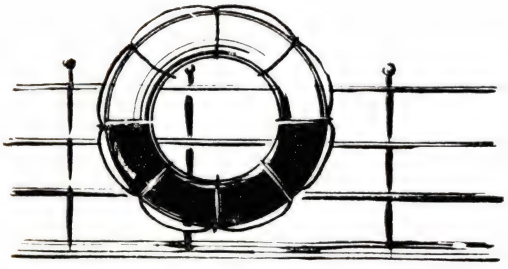


Рис. 13.

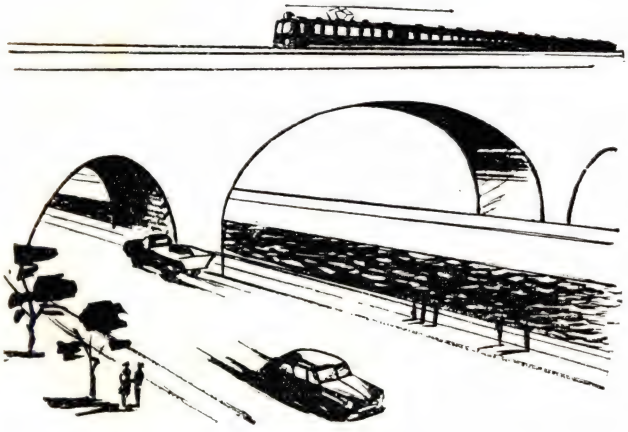


Рис. 14.

разной формы: одни из них эллиптические, другие — параболические (рис. 14). На парапете моста часто укрепляют спасательные круги. Спасательный круг по форме очень близок к тору. Тор — это поверхность, образующаяся при вращении окружности вокруг оси, с которой она не пересекается (рис. 13). Тор обладает многими замечательными свойствами.

Мы подходим к радиостанции. Там возвышаются радиомачты с излучателями электромагнитных колебаний на верхушках. Но какой странной формы эти мачты! Они состоят из отдельных частей (секций), поставленных друг на друга (рис. 15). А каждая секция похожа на круглую сетку, образованную прямолинейными стержнями.

Рассмотрим любую из секций (они отличаются только размерами). Представим себе, что стержни расположены вплотную друг к другу. В таком случае они будут образовывать замечательную кривую поверхность, которая называется однополостным гиперболоидом и состоит из прямых линий. Те прямолинейные стержни, которые мы видим, не что иное, как прямолинейные образующие этой поверхности. Посмотрите на однополостный гиперболоид, изображенный на рис. 16. Трудно поверить, что он состоит из прямых линий. Однако это именно так. Эта конструкция очень легка и отличается исключительной прочностью.

Своим названием однополостный гиперболоид обязан гиперболе. Эта поверхность образована вращением гиперболы вокруг той из ее осей, которая ее не пересекает (рис. 16). В таком

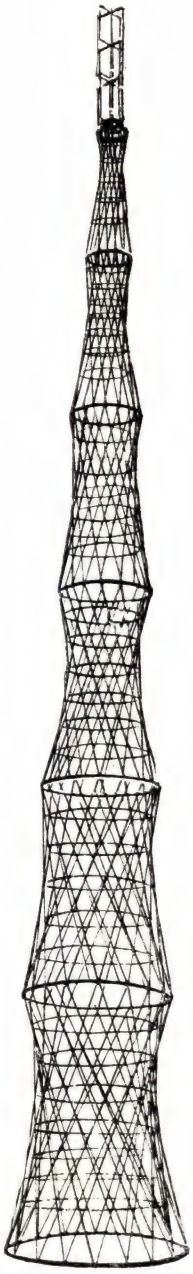


Рис. 15.

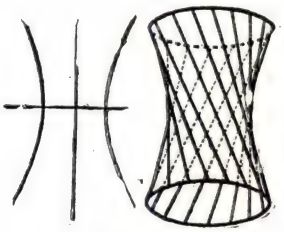


Рис. 16.

случае при вращении образуется единая поверхность (одна полость). Но если бы мы вращали нашу гиперболу вокруг другой оси, то получили бы поверхность, состоящую из двух частей (полостей), которую называют двуполостным гиперболоидом.

Иногда строят односекционные вышки из прямолинейных металлических стержней высотой в многоэтажный дом. Так построена водонапорная башня около Сельскохозяйственной академии им. Тимирязева в Москве. Такие башни были впервые сконструированы советским инженером В. Г. Шуховым (1853—1939) и называются шуховскими башнями.

А теперь сядем в поезд. Город остался далеко позади. Бегут телеграфные столбы. Но и здесь геометрия не покидает нас. Вдоль дороги на столбах натянуты провода. Вот проходит линия высоковольтной передачи. Провода от собственной тяжести слегка провисают. Какая же линия образуется при этом? Такой вопрос имеет большое практическое значение. Когда требуется определить длину провода, необходимого для передачи электроэнергии на большие расстояния, приходится учитывать, что его длина (за счет провисания) будет большей, чем расстояние между конечными пунктами линии электропередачи. И чтобы точно подсчитать длину проводов, необходимо определить, какая именно линия образуется при провисании провода между каждыми двумя столбами. Оказывается, провод провисает по так называемой цепной линии.

Точно так же провисает и шнур, укрепленный на двух гвоздиках, вбитых в стену. Цепная линия очень похожа на параболу, но это не парабола; свойства цепной линии и параболы различны.

Наш поезд идет по прямолинейному железнодорожному пути и время от времени плавно проходит закругления рельсов. Плавное движение поезда на изгибах железнодорожного полотна обусловлено тем, что железнодорожный путь на закруглениях искривлен не просто по окружности, а также и по некоторым довольно замысловатым кривым. Лишь иногда, на очень крутых поворотах, мы ощущаем, что нас слегка отталкивает к одной из стенок вагона. Мы знаем, что в этом случае на вагоны действует центробежная сила, стремящаяся опрокинуть их и отклоняющая все тела, находящиеся в поезде, к внешней стороне закругления.

Чтобы вагоны не опрокинулись, внешний рельс железнодорожного полотна на поворотах слегка поднимают по сравнению с внутренним, и этот подъем делают тем больше, чем круче поворот. Но если заставить поезд сразу переходить с прямолинейного участка пути на круговой, то надо сразу и круто приподнять один из рельсов, и вагоны будут испытывать при переходе резкие и сильные толчки. Чтобы этого избежать, переход на закругление делают постепенным. После прямолинейного участка пути рельсы сначала укладывают по так называемой переходной кривой (вдоль которой искривленность возрастает постепенно), и лишь потом эту кривую переводят в окружность. Так же поступают и в конце поворота. В качестве переходных кривых используются разные линии (в зависимости от кривизны поворота, скорости поезда на повороте и т. д.). Обычно применяют либо дугу кубической параболы, либо дугу лемнискаты, либо дугу так называемой спирали Корню.

Рис. 17.

До сих пор мы говорили только о тех простейших линиях и поверхностях, которые видны с первого взгляда, где бы мы ни были, куда бы ни пошли. А если присмотреться внимательнее, мы будем обнаруживать все новые и новые линии и поверхности.

Заглянем на завод. Заводские трубы — пример усеченного конуса; широкие снизу, они постепенно суживаются кверху (рис. 17). На заводе работают станки. Какое множество самых разнообразных линий описывают различные движущиеся части станков! На любом винте имеются винтовые нарезки, мы увидим станки с эллиптическими колесами, зубчатые колеса с самыми разнообразными формами зубцов, выточенными по дуге циклоиды, эллипса, эволюты круга. Свойства этих кривых, имеющих важное применение в технике, изучаются высшей математикой.

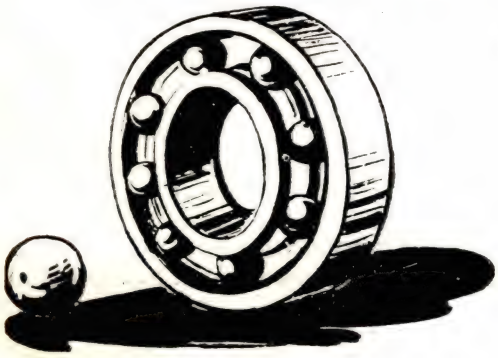


Рис. 18.

Кажется, мы не упомянули еще о шаровой поверхности. А ведь и она встречается часто. Вспомним хотя бы шариковые подшипники (рис. 18). Более того, форму шара придают иногда и газгольдерам, т. е. резервуарам для хранения газа. Это объясняется одним замечательным свойством шаровой поверхности: на изготовление шара расходуется значительно меньше материала, чем на сосуд любой другой формы того же объема.

А сколько еще встречается различных поверхностей, сложных по форме, не имеющих специальных названий!

Вот паровой котел, напоминающий цилиндр. В нем находится пар под высоким давлением. Поэтому стенки цилиндра слегка (пусть незаметно для глаза) изгибаются, образуя поверхность очень сложной и неправильной формы, которую, однако, инженеры обязаны хорошо знать, чтобы суметь рассчитать котел на прочность. Сложную форму имеет и корпус подводной лодки. Он должен быть хорошо обтекаемым, прочным и вместительным (рис. 19). Обратите внимание на форму корабельного корпуса. От нее зависит и прочность корабля, и его устойчивость, и скорость (рис. 20).

Высокие скорости движения заставили инженеров обратить серьезное внимание на форму современных поездов, самолетов, автомобилей. Именно от нее зависит встречное сопротивление воздуха, которое быстро возрастает с увеличением скорости. А если форма будет удачной, обтекаемой, сопротивление воздуха можно значительно уменьшить. Например, гоночный автомобиль. Его кузову придают такую форму, чтобы встречные потоки воздуха плавно обтекали машину (рис. 21).

Мотор автомобиля заключен в обтекаемый капот, ветровое стекло отклонено назад, крыша кузова плавно переходит в наклонную заднюю стенку. И капот, и крыша, и задняя стенка — не плоские. Они представляют собой сложные поверхности, с которыми школьная математика не имеет дела. Но ими очень интересуются инженеры, тщательно их рассчитывающие в своих конструкторских бюро.

Итак, мы познакомились со множеством различных линий, поверхностей и тел, которые нас окружают. Теперь вы и сами, несомненно, заметите множество таких геометрических форм, о которых мы здесь не упоминали.

Впрочем, об одной из них, о линии, которую никто не видит, но которая всегда находится около нас, мы расскажем, ибо заметить ее самому, ничего не зная о ней заранее, невозможно.

Пол и потолок в нашей комнате поддерживаются балками, концы которых вмурованы в стены. Балки под влиянием большой нагрузки слегка прогибаются (этот прогиб незаметен для глаза), и, чтобы рассчитать допустимую нагрузку на балки, архитектор должен знать линию их прогиба. Оказывается, балка, поддерживающая пол или потолок, прогибается по кривой, которая называется параболой 4-й степени. Не будет преувеличением сказать, что эта линия всегда находится у нас под ногами и всегда висит над нашей головой.

Наша статья подходит к концу. В заключение напомним, что все мы живем тоже на своеобразной поверхности, которая, хотя и именуется земным шаром, на самом деле является, как говорят астрономы, геоидом и по форме

очень близка к эллипсоиду вращения. Этот эллипсоид образован вращением эллипса вокруг его малой оси. Правда, он мало отличается от шара (полуоси эллипса, вращением которого образован геоид, относятся друг к другу, как $\frac{299}{300}$). Но все-таки это различие приходится принимать во внимание при составлении географических карт.

Мы видим, сколько самых разнообразных геометрических линий и поверхностей использует человек в своей деятельности — при строительстве жилищ, фабрик, заводов, мостов, машин, в сухопутном, морском и воздушном транспорте. Пользуется же он ими не из простой любви к интересным геометрическим фигурам, а потому, что свойства этих геометрических линий и поверхностей позволяют с наибольшей простотой решать разнообразные технические задачи.

Но, чтобы применять эти свойства в технике, надо их знать. Следовательно, надо изучать все эти линии и поверхности. И не только их, но и многие другие, так как техника развивается и с каждым годом использует для своих нужд все новые и новые геометрические формы.

Изучая свойства различных линий и поверхностей, мы ставим себе целью выразить эти свойства в виде формул, чтобы уметь по ним производить расчеты наших машин, зданий и многих других сооружений.

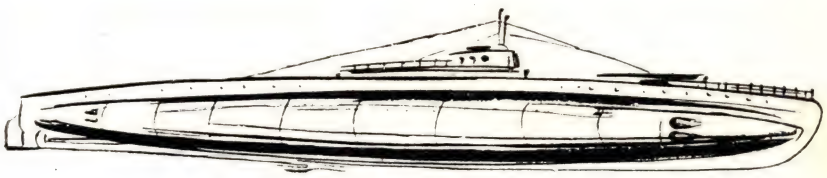


Рис. 19.

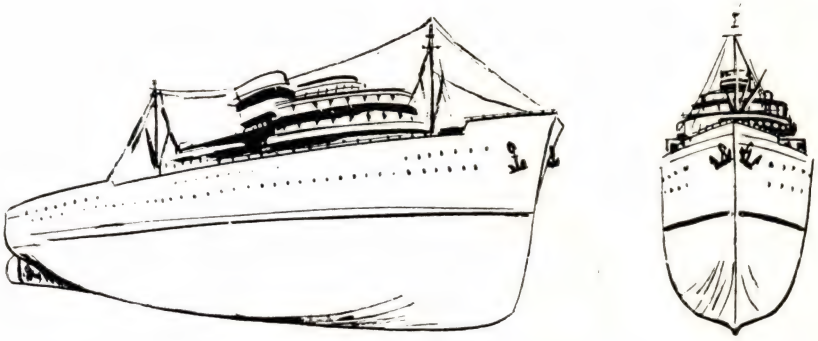


Рис. 20.

Рис. 21.

Из всего сказанного видно, какую важную роль в нашей жизни играет геометрия.

Наша школьная, элементарная геометрия изучает лишь простейшие из геометрических фигур. Но существуют и другие геометрические науки, изучающие более сложные линии и поверхности.

С некоторыми вопросами, которые рассматривают эти разделы геометрии, вы познакомитесь в следующих главах.

КАК ВОЗНИКЛА ГЕОМЕТРИЯ

Геометрия, как и другие науки, возникла из потребностей практики. Само слово «геометрия» — греческое, в переводе означает «землемерие».

Люди очень рано столкнулись с необходимостью измерять земельные участки. Уже за 3—4 тыс. лет до н. э. каждый клочок плодородной земли в долинах Нила, Тигра и Евфрата, рек Китая имел значение для жизни людей. После разлива рек, особенно Нила, приходилось вновь делить землю. Это требовало определенного запаса геометрических и арифметических знаний.

Но вот урожай собран. Как в то время

отмеривали зерно? Первоначально это делали так, как поступаем и мы при измерении воды или керосина, т. е. мерили его по объему. Выбирали в качестве единицы измерения сосуд определенной вместимости и считали, сколько содержится таких сосудов в кучке зерна. Этот первый способ определения объема приводил к вопросу о соотношении между объемами разных тел.

Постепенно люди начали измерять и изучать свойства более сложных геометрических фигур.

По дошедшим до нас египетским папирусам и древневавилонским текстам видно, что уже за 2 тыс. лет до н. э. люди умели определять площади треугольников, прямоугольников, трапеций, приближенно вычислять площадь круга. Они знали также формулы для определения объемов куба, цилиндра, конуса, пирамиды и усеченной пирамиды. Сведения по геометрии вскоре стали необходимы не только при измерении земли. Развитие архитектуры, а несколько позднее и астрономии предъявило геометрии новые требования. И в Египте и в Вавилоне сооружались колоссальные храмы, строительство которых могло производиться только на основе предварительных расчетов. В VI в. до н. э. на о-ве Самос (одно из древнегреческих островных государств) был построен водопровод, по которому вода в город поступала из источника, лежащего за горой Кастро. Водопровод проходил через туннель длиной в 1 *км*. Замечательно, что туннель этот начали рыть с обеих сторон одновременно и что оба участка его почти точно сошлись под землей! Это значит, что предварительно было определено направление туннеля, т. е. решена задача вычислительной геометрии, которая и сейчас считается в инженерном деле отнюдь не простой. При этом строители древности должны были пользоваться какими-то чертежами, должны были знать учение о подобии. К этому времени были хорошо известны частные случаи так называемой теоремы Пифагора, уже знали, что если взять треугольники со сторонами a, b и c, где a, b и c — такие целые числа, что $a^2+b^2=c^2$, то эти треугольники будут прямоугольными. В таком виде теорема Пифагора и обратные ей предложения были известны в Вавилоне и в Древнем Китае.

И все же, несмотря на то что человечество накопило такие обширные знания геометрических фактов, геометрия как наука еще не существовала.

ВОЗНИКНОВЕНИЕ ГЕОМЕТРИИ КАК НАУКИ

Геометрия стала наукой только после того, как в ней начали систематически применять логические доказательства, начали выводить геометрические предложения не только путем непосредственных измерений, но и путем умозаключений, путем вывода одного положения из другого, и устанавливать их в общем виде. Это произошло в Древней Греции в VI—IV вв. до н. э. Обычно этот переворот в геометрии связывают с именем ученого и философа VI в. до н. э. Пифагора Самосского. О Пифагоре мы не знаем почти ничего достоверного. Уже в древности он стал полулегендарной личностью. Известно, однако, что в V в. до н. э. многие крупные математики называли себя пифагорейцами. Это дает основание считать, что Пифагор был главой первой математической школы. Именно ему греки приписывают создание геометрии как науки.

Подумаем теперь над вопросом: почему логические доказательства играют такую существенную роль в геометрии и вообще в математике? Дело в том, что большинство предложений геометрии являются утверждениями, относящимися к бесконечному множеству объектов. Например, можно ли установить без доказательства, что сумма углов треугольника равна $2d$? Нет, нельзя. Во-первых, потому, что на практике мы никогда не имеем дело с теми треугольниками, которые рассматривает геометрия. Все реальные треугольники, нарисованные на бумаге, не будут точными треугольниками. Если посмотреть под микроскопом на их стороны, то

мы убедимся, что это не прямые а неровные палочки из графита (если рисунок, сделан карандашом). Идеальный математический треугольник никогда не может быть осуществлен на практике. Это — отвлеченный математический образ, объединяющий в себе некоторые основные свойства реальных треугольников. Во-вторых, если бы даже мы и могли измерять идеальные треугольники, то и тогда невозможно было бы убедиться в справедливости высказанной теоремы, потому что различных треугольников бесконечно много, а нам пришлось бы перебрать их все! Наконец, даже для одного треугольника мы не могли бы установить эту теорему, потому что измерение углов всегда производится с некоторой определенной степенью точности, так что мы могли бы только убедиться, что сумма углов треугольника лишь приблизительно равна 180°, скажем, отличается от 180° небольше, чем на 0°1′, или 0°0′1″.

Торжеством нового метода было открытие того, что не все отрезки имеют общую меру, что существуют несоизмеримые отрезки. Это открытие ученые никогда не смогли бы сделать, исходя из непосредственной практики измерений: ведь такие измерения всегда производятся с известной степенью точности, и поэтому в пределах этой точности все отрезки соизмеримы. По-видимому, первыми открытыми несоизмеримыми отрезками были сторона и диагональ квадрата. Древнейшее доказательство дошло до нас; оно проводится методом от противного и опирается на теорему Пифагора и на одно предложение теории чисел. Вот это доказательство (рис. 1): пусть сторона и диагональ квадрата соизмеримы, т. е. существует такой отрезок f, который укладывается целое число раз и на стороне и на диагонали квадрата: $AC = Pf$, $AB = Qf$ и $\frac{AC}{AB} = \frac{Pf}{Qf} = \frac{p}{q}$, где $\frac{p}{q}$ — несократимая дробь. Тогда $\frac{AC^2}{AB^2} = \frac{p^2}{q^2}$. Но по теореме Пифагора $AC^2 = 2AB^2$, т. е. $p^2 = 2q^2$.

Следовательно, p^2 — четное число. Отсюда по известной древним арифметической теореме следовало, что и p — четное: $p = 2t$. Тогда $4t^2 = p^2 = 2q^2$ и $q^2 = 2t^2$, т. е. и q — четно. Приходим к противоречию с предложением о том, что $\frac{p}{q}$ — несократимая дробь.

Открытие несоизмеримости произвело потрясающее впечатление на ученых древности. До этого вся метрическая геометрия и теория подобия опирались на арифметику рациональных чисел. Люди считали, что рациональных чисел, т. е. целых чисел и дробей, вполне достаточно для того, чтобы измерить любую величину. И вдруг оказалось, что это не так: какой бы маленький отрезок мы ни выбрали, он не сможет поместиться целое число раз и на стороне и на диагонали квадрата. Аристотель — величайший философ древности — говорил, что наука возникла от удивления, например от удивления по поводу того, что диагональ и сторона квадрата несоизмеримы. Другой крупнейший греческий философ — Платон писал, что до того, как он узнал о существовании несоизмеримых отрезков, он был подобен неразумному животному.

Трудно рассказать в немногих словах, какое влияние имело это открытие на развитие математики. Его можно, пожалуй, сравнить только со значением открытия неевклидовой геометрии для развития науки XIX—XX вв. Непосредственные следствия этого открытия были таковы: 1) древние греки убедились в том, что многие отрезки, например диагональ и сторону квадрата или гипотенузу и сторону прямоугольного треугольника со сторонами 1 и 2, нельзя выразить рациональными числами,

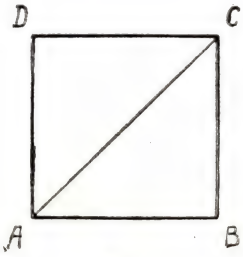


Рис. 1.

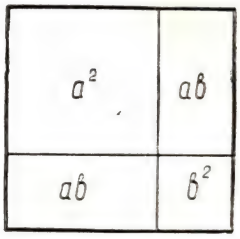


Рис. 2.

зато можно построить с помощью циркуля и линейки. Поэтому они в своих теоретических исследованиях перешли от вычисления к построениям. Алгебраические тождества и уравнения они записывали не с помощью букв, как это мы теперь делаем в алгебре, а с помощью соотношений между геометрическими фигурами. Например, тождество $(a+b)^2=a^2+2ab+b^2$ записывалось так, как это изображено на рис. 2.

Уравнение $x^2=ab$ на языке геометрии формулировалось так: преобразовать данный прямоугольник со сторонами a и b в квадрат. Сторону квадрата x, как известно, можно найти геометрически с помощью циркуля и линейки. Как это делается, видно из прилагаемого чертежа (рис. 3). Таким образом, геометрия стала языком математики того времени. И алгебра, и даже арифметика излагались с ее помощью. Это, конечно, сильно способствовало развитию и самой геометрии.

2) Греческие ученые поставили и решили проблему об определении отношения величин даже тогда, когда эти величины несоизмеримы. Чтобы дать представление, насколько глубока была эта теория, скажем только, что в новое время аналогичные теории были построены лишь в конце прошлого века.

Все эти новые проблемы и созданные в связи с ними теории привели к тому, что совершенствовались сами способы математических доказательств, возрастала потребность создания стройной логической системы в геометрии.

ПОСТРОЕНИЕ ДЕДУКТИВНОЙ СИСТЕМЫ

Но как строить такую систему? Ведь каждое отдельное предложение мы доказываем, опираясь на некоторые другие предложения. Эти предложения в свою очередь доказываются ссылкой на какие-то третьи предложения и т. д. Эти ссылки мы могли бы продолжать до бесконечности, и процесс доказательства никогда бы не закончился. Как же быть? Это обстоятельство заметили еще в древности, и тогда же был найден выход. Не позднее IV в. до н. э. греческие математики при построении геометрии выбирали некоторые предложения, которые принимались без доказательства, а все остальные предложения выводили из них строго логически. Предложения, принятые без доказательства, назывались а к с и о м а м и и п о с т у л а т а м и.

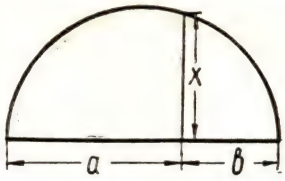


Рис. 3.

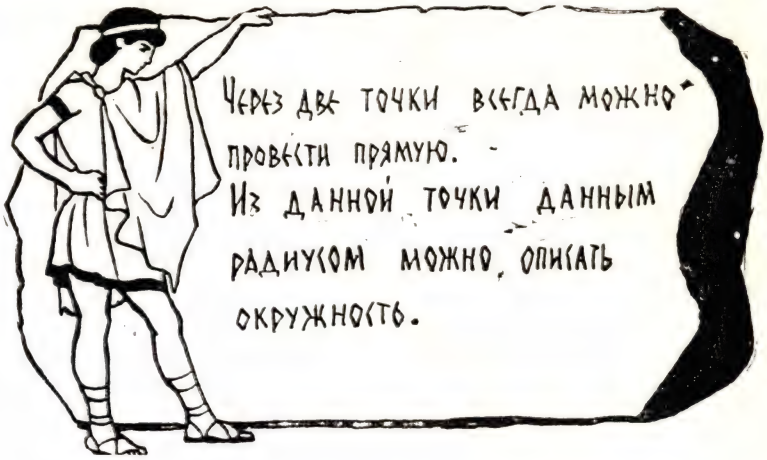
Наиболее совершенным образцом такой теории на протяжении более 2 тыс. лет служили «Начала» Евклида, написанные около 300 г. до н. э.

В качестве постулатов Евклид выбрал такие предложения, в которых утверждалось то, что можно проверить простейшими построениями с помощью циркуля и линейки, например: 1) через две точки всегда можно провести прямую линию (это можно сделать с помощью линейки), 2) из данной точки данным радиусом можно описать окружность (это можно сделать с помощью циркуля). Евклид принял также некоторые общие предложения-аксиомы, например, что две величины, порознь равные третьей, равны между собой. Они были названы аксиомами.

На основе своих постулатов и аксиом Евклид строго и систематично развил всю планиметрию, а с ее помощью построил элементы алгебры и учение о квадратных уравнениях. В его сочинении содержится также общая теория отношений, которая применяется в учении о подобии, теория чисел, метод определения площадей и объемов и основы стереометрии. Венчает «Начала» учение о правильных многогранниках, т. е. таких, у которых все грани являются равными между собой правильными многоугольниками. Евклид доказал, что существуют пять правильных многогранников: тетраэдр, куб, октаэдр, додекаэдр и икосаэдр—и никаких

других правильных многогранников быть не может.

Можно сказать, что Евклид в своих «Началах» заложил основы не только геометрии, но и всей античной математики.



На новую, более высокую ступень исследования основ геометрии ученые поднялись только в XIX в. Тогда было выяснено, что Евклид перечислил не все аксиомы, которые на самом деле нужны для построения геометрии. В действительности при доказательствах он ими пользовался, хотя и формулировал их. Однако все это нисколько не умаляет роли Евклида, который первым показал, как можно и как нужно строить математическую теорию. Созданный им дедуктивный метод прочно вошел в математику. В этом смысле все последующие математики, вплоть до наших современников, являются учениками Евклида.

Гениальный русский ученый Николай Иванович Лобачевский (1792—1856) построил новую систему геометрии, в основе которой лежит постулат о параллельности, противоположный V постулату Евклида. Если в геометрии Евклида через точку вне прямой в плоскости, определяемой этой точкой и этой прямой, можно провести только одну прямую, не пересекающую данной, то в геометрии Лобачевского можно провести бесконечно много таких прямых. Система геометрии Лобачевского оказалась столь же непротиворечивой, как и Евклидова. Впоследствии крупнейший немецкий математик Бернгард Риман нашел общий метод построения таких неевклидовых геометрий, в которых можно мерить длины, площади, углы и другие геометрические величины. С помощью новых геометрий удалось описать физические явления, которые не могли быть поняты с точки зрения геометрии Евклида и физики Ньютона. Более подробно об этом вы сможете узнать из статьи «О различных геометриях».

ИЗМЕРЕНИЕ ДЛИН, ПЛОЩАДЕЙ И ОБЪЕМОВ

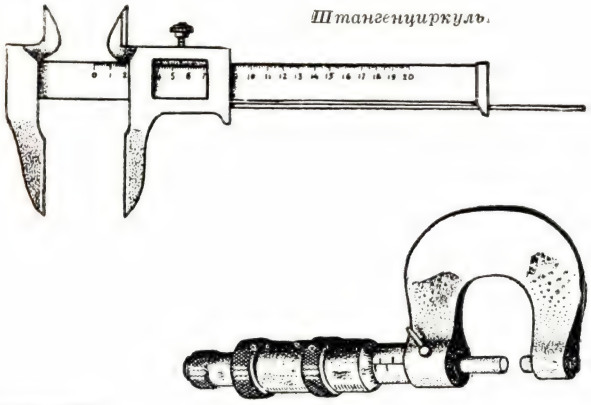
ИЗМЕРЕНИЕ ДЛИН

Представим, что нам нужно определить, какой из двух предметов (например, двух прямых металлических стержней) длиннее. Для этого их сравнивают, т. е. прикладывают друг к другу, и получают требуемый ответ.

Какой стержень длиннее?

Понятно, что далеко не всякие два предмета можно сравнивать по длине подобным образом. Если, например, нужно определить, какой из двух мостов длиннее, то указанный способ сравнения будет уже непригодным. В таких случаях прибегают к так называемому процессу измерения. При измерении предметов каждому из них ставится в соответствие некоторое число, называемое длиной предмета. После этого более длинным считают тот предмет, для которого при измерении получено большее число.

Обычно измерения проводят так: к измеряемому стержню прикладывают линейку с делениями, расстояния между которыми равны длине эталона (например, 1 *см*) или его долям. Затем отмечают, что в стержне уложилось a_0 целых сантиметров и a_1 десятых долей сантиметра (*мм*). Если измерение хотят произвести более точно, то, применяя, например, штангенциркуль или микрометр, обнаруживают, что в отрезке уложилось a_2 сотых, a_3 тысячных долей сантиметра и т. д.



Штангенциркуль.

Микрометр.

В любом случае в результате такого измерения мы получаем некоторую конечную десятичную дробь $a_0+\frac{a_1}{10}+\frac{a_2}{10^2}+\cdots+\frac{a_n}{10^n}$. Это число и принимается за длину стержня. Увеличение точности измерения может привести к тому, что у этой дроби увеличится количество цифр, но всегда, разумеется, она будет конечной.

Однако прямое измерение многих предметов бывает трудно и очень часто совершенно невозможно провести. Например, как определить расстояние между небесными телами? Для этого необходимо создать специальные геометрические методы, которые позволили бы заменить непосредственное измерение вычислениями по формулам.

Геометрия изучает отвлеченные понятия: точки, прямые, плоскости (см. статью «О различных геометриях»), в то время как в реальном мире встречаются лишь конкретные предметы. При измерении конкретного предмета процесс непременно оборвется, с какой бы точностью мы его ни производили.

Если же мы будем измерять геометрический отрезок AB с помощью другого геометрического отрезка PQ, принимаемого за эталон (единицу длины), может случиться, что процесс измерения будет продолжаться неограниченно. В результате измерения тогда получится бесконечная десятичная дробь. Это будет иметь место, если, например, измеряемый отрезок AB составляет $\frac{1}{3}$ отрезка PQ. Для измерения отрезка AB делим отрезок PQ на десятые доли, затем на сотые и т. д. Тогда в процессе измерения получится бесконечная периодическая дробь 0,333...

Может случиться, что измерение даст бесконечную непериодическую дробь. В школьном курсе, например, доказывается, что если AC — диагональ квадрата, а BC — его сторона, то в результате измерения AC при помощи BC получается бесконечная непериодическая десятичная дробь 1,4142135..., представляющая собой иррациональное число $\sqrt{2}$. Каждому восьмикласснику хорошо известно, как находить десятичные знаки этого числа.

Таким образом, в геометрии в результате процесса измерения каждому отрезку AB ставится в соответствие некоторое (рациональное или иррациональное) число, которое мы будем обозначать $l\ (AB)$. **Это число называется длиной отрезка.**

Какими же свойствами обладает длина отрезка? Перечислим четыре основных свойства.

1°. Очевидно, длина отрезка есть число положительное:

$$l\,(AB) > 0.$$

2° Если отрезки A_1B_1 и A_2B_2 равны, т. е. совпадают при наложении, то их длины (числа, полученные при их измерении) также равны:

$$l\,(A_1B_1) = l\,(A_2B_2).$$

3°. Если точка C лежит на отрезке AB, то число, полученное в результате измерения AB, равно сумме чисел, полученных при измерении отрезков AC и CB, т. е.

$$l\,(AB) = l\,(AC) + l\,(CB).$$

Это свойство длины на первый взгляд представляется очевидным: ведь отрезок AB состоит из отрезков AC и CB. На самом же деле здесь не все так просто. Действительно, нужно проверить, что если, например, при измерении AC получается бесконечная дробь $\sqrt{2}=1{,}4142135...$, а при измерении CB — другая бесконечная дробь $\sqrt{3}=1{,}7320508...$ и мы составим эти отрезки вместе в один отрезок AB и будем его измерять тем же эталоном, то получится бесконечная дробь $\sqrt{2}+\sqrt{3}=3{,}146264...$ Если хорошо вдуматься, то станет ясно, что здесь далеко не очевидно, какими будут десятичные знаки числа, полученного при измерении отрезка AB.

Таким образом, свойство 3° необходимо проверять. Доказательство того, что оно действи-

тельно имеет место, приводится во многих подробных руководствах по геометрии.

4°. Очевидно, что в результате измерения эталонного отрезка PQ получится единица: $l(PQ)=1$.

Итак, в результате измерения каждому отрезку ставится в соответствие число-длина, обладающее свойствами 1°—4°.

Число $l(AB)$ всякий раз представляет собой конечную или бесконечную десятичную дробь, которую можно записать так:

$$l(AB)=a_0+\frac{a_1}{10}+\frac{a_2}{10^2}+\frac{a_3}{10^3}+\ldots$$

Представим себе теперь, что при измерении отрезка AB мы отрезок PQ разбиваем не на 10 частей, а на 7, затем каждую из полученных частей вновь разбиваем на 7 частей, и т. д.

Тогда в процессе измерения получится какое-то число

$$\lambda(AB)=b_0+\frac{b_1}{7}+\frac{b_2}{7^2}+\frac{b_3}{7^3}+\ldots$$

Возникает вопрос о том, равны ли числа, полученные при различных способах измерения отрезка AB — иными словами, равны ли $l(AB)$ и $\lambda(AB)$. Можно доказать, что в обоих случаях эти числа равны, т. е. результат измерения не зависит от того, каким способом оно производится. Это доказательство опирается лишь на тот факт, что как числа $l(AB)$, так и числа $\lambda(AB)$ обладают свойствами 1°—4°.

Свойства 1°—4° однозначно определяют длины всех отрезков. Эти свойства являются теми минимальными требованиями, выполнение которых позволяет полностью найти длины всех отрезков.

Их мы и примем в качестве аксиом для построения теории измерения длин.

ИЗМЕРЕНИЕ ПЛОЩАДЕЙ

Теперь представим себе, что нужно сравнить между собой два куска жести произвольной формы. Как и отрезки, их можно наложить один на другой. Если при этом первый целиком уложится во втором, то считают, что второй кусок больше. Но такой ответ, да и способ его получения вряд ли могут нас удовлетворить. Во-первых, может случиться, что ни один из этих кусков целиком не укладывается на другом. Во-вторых, сам ответ (больше или меньше) еще мало о чем говорит, в практических целях надо еще знать — насколько. В-третьих, вообще не всякие два предмета можно переносить с места на место. В самом деле, как сравнить между собой два земельных участка?

Надо каждому участку поставить в соответствие некоторое число, называемое площадью участка, которое характеризовало бы его величину. Понятно, что процесс измерения участков должен оказаться значительно сложнее процесса измерения отрезков. Это вызвано, естественно, большим разнообразием форм участков. Сразу же возникает необходимость в построении геометрической теории, которая давала бы возможность ответить на многие важнейшие практические вопросы.

Перейдем теперь к изложению того, как в геометрии можно решить задачу об измерении площадей.

Рассмотрим на плоскости всевозможные участки, ограниченные одной или несколькими ломаными линиями с конечным числом звеньев. Такие участки — мы будем их далее называть многоугольниками — изображены на рис. 1.

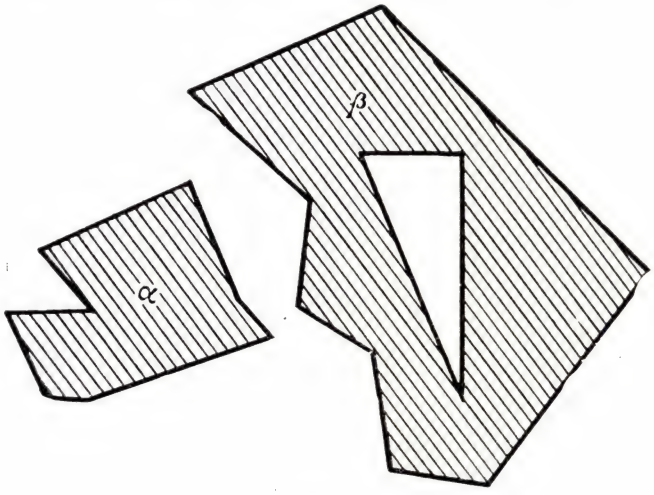


Рис. 1.

Задача состоит в том, чтобы для всех таких многоугольников найти числовые характеристики, называемые площадями этих многоугольников. Сами многоугольники будем обозначать греческими буквами α, β, ..., а их площади $S(\alpha)$, $S(\beta)$,... Какими же свойствами должно обладать число S, чтобы его было естественно считать площадью? Эти желательные свойства можно почерпнуть из большого практического опыта.

1°. Площадь каждого многоугольника должна быть положительным числом:

$$S(\alpha)>0.$$

2°. Если многоугольники α и β при наложении совпадают, то их площади должны быть равны:

$$S(\alpha) = S(\beta).$$

3°. Если многоугольник α разбит на два многоугольника β и γ, то

$$S(\alpha) = S(\beta) + (S(\gamma).$$

4°. Площадь некоторого эталонного многоугольника (например, квадрата ω со стороной 1) равна единице:

$$S(\omega) = 1.$$

Теперь поставим два вопроса:

I. Разрешима ли задача измерения площадей многоугольников? Иными словами, можно ли указать прямой способ, который сопоставлял бы с каждым многоугольником число, обладающее свойствами 1°—4°?

II. Единственным ли образом разрешима задача измерения? Иными словами, будут ли площади многоугольников однозначно определяться свойствами 1°—4°?

Можно доказать, что оба эти вопроса решаются положительно. Не приводя доказательства, укажем только на некоторые принципиальные трудности, связанные с его проведением. Здесь, как и при измерении отрезков, нужно сконструировать некоторый измерительный процесс, позволяющий для каждого многоугольника α найти число $S(\alpha)$ так, чтобы выполнялись свойства 1°—4°. Сделать это можно различными способами. Опишем вкратце один из возможных измерительных процессов.

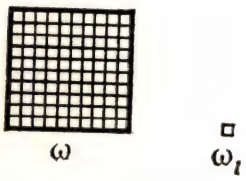


Рис. 2.

Рассмотрим сначала квадрат ω, сторона которого равна 1. Разобьем теперь каждую сторону квадарта на 10 равных частей, проведем через точки деления прямые, параллельные сторонам квадрата на (рис. 2). Квадрат ω, очевидно, разобьется на $10^2=100$ маленьких равных квадратиков со стороной $\frac{1}{10}$. Обозначим каждый из них через ω_1. Площади их (если только площадь обладает свойством 2°) должны быть равны. В силу свойства 3° сумма всех площадей квадратиков ω_1 должна быть равна площади квадрата ω, которая по свойству 4° равна 1. Следовательно,

$$10^2 S(\omega_1) = S(\omega) = 1. \text{ Отсюда } S(\omega_1) = \frac{1}{10^2}.$$

Если, поступая аналогичным образом, разбить квадратик ω_1 на 100 квадратиков ω_2, то

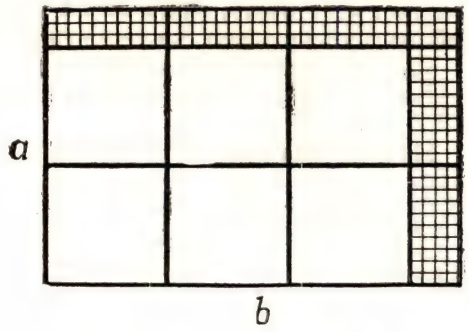


Рис. 3.

легко видеть что площадь $S(\omega_2) = \frac{1}{100^2}$. Разбивая квадратик ω_2 на 100 квадратиков ω_3, найдем, что $S(\omega_3) = \frac{1}{1000^3}$, и т. д.

Рассмотрим теперь прямоугольник α (рис. 3), одна сторона которого $a=2{,}3$, а вторая $b=3{,}4$. По рис. 3 легко сообразить, что прямоугольник α разбивается на 6 квадратиков ω и 182 квадратика ω_1. На основании свойств 2°, 3°, 4° и установленного соотношения между площадями $S(\omega)$ и $S(\omega_1)$, имеем:

$$S(\alpha) = 6S(\omega) + 182\,S(\omega_1) =$$

$$= 6 \cdot 1 + 182 \cdot \frac{1}{10^2} = 7{,}82 = ab.$$

Аналогично можно показать, что и в общем случае площадь прямоугольника $S(\alpha)$ равна произведению ab длин его смежных сторон, так как площадь обладает свойствами 1°—4°. Доказательство здесь значительно усложняется в том случае, когда хотя бы одно из чисел a, b выражается бесконечной десятичной дробью.

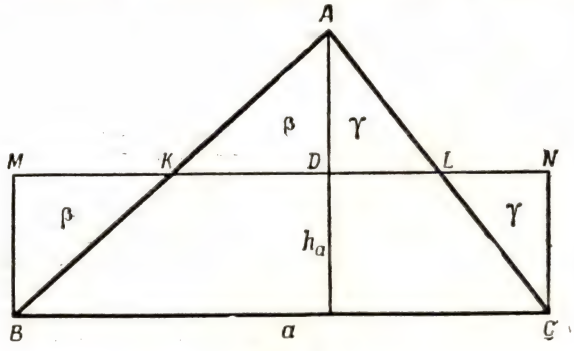


Рис. 4.

Обозначим теперь через Δ произвольный треугольник ABC (рис. 4). Пусть $BC=a$ — его наибольшая сторона, а h_a — высота, опущенная на эту сторону. Тогда, проводя среднюю линию KL и опуская на нее перпендикуляры AD, BM и CN, установим, что треугольники, обозначенные

одинаковыми греческими буквами (β и γ), равны. Так как треугольник Δ и прямоугольник $BCNM$ составлены из равных частей (двух треугольников β и γ и трапеции $BKLC$), то, пользуясь свойствами 2°—3°, легко найдем:

$$S(\Delta) = S(\beta) + S(\gamma) + S(BKLC) = S(BCNM).$$

Площадь же прямоугольника $BCNM$ равна, очевидно, $\frac{1}{2}\,ah_a$. Таким образом, мы доказали, что площадь треугольника $S(\Delta)$ равна $\frac{1}{2}\,ah_a$.

Однако здесь надо доказать (и это делается легко), что $ah_a = bh_b = ch_c$, т. е. что $S(\Delta)$ не зависит от выбора в качестве основания любой стороны треугольника.

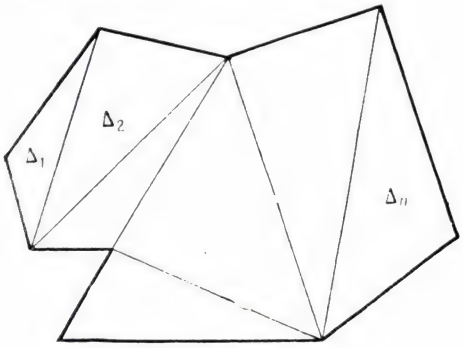


Рис. 5.

Рассмотрим далее многоугольник α. Какимнибудь способом (см., например, рис. 5) его можно разбить на конечное число треугольников $\Delta_1, \Delta_2, \ldots, \Delta_n$. После этого, желая соблюсти условие 3°, площадь $S(\alpha)$ многоугольника α положим равной сумме площадей треугольников разбиения:

$$S(\alpha) = S(\Delta_1) + S(\Delta_2) + \ \ldots \ + S(\Delta_n).$$

На этом и заканчивается процесс измерения площади многоугольника. Будем называть этот процесс т р и а н г у л я ц и е й. Но здесь есть одна тонкость: необходимо сразу же доказать, что при различных разбиениях многоугольника α на треугольники, т. е. при различных триангуляциях, всегда будет получаться одно и то же число $S(\alpha)$. Иными словами, надо доказать, что числовой результат указанного измерения многоугольника α не зависит от самого способа этого измерения.

Далее нужно доказать, что числа $S(\alpha)$, найденные указанным процессом, удовлетворяют всем четырем условиям 1°—4°. Этим завершается доказательство разрешимости задачи измерения площадей (вопрос I).

Наконец, последнее. Мы описали некоторый измерительный процесс, состоящий в разбиении многоугольника на треугольники. Укажем сейчас другой измерительный процесс, по внешнему виду совершенно отличный от описанного выше, который также дает возможность всем многоугольникам α поставить в соответствие числа $\sigma(\alpha)$, обладающие свойствами 1°—4°. Будем называть этот процесс к в а д р и р о в а н и е м.

Для этого покроем многоугольник α, изображенный на рис. 6, квадратной сеткой, состоящей из квадратов ω. Каждый из квадратов ω разобьем на 10^2 квадратиков ω_1. Каждый квадрат ω_1 разобьем на 10^2 квадратиков ω_2, и т. д.

Подсчитаем, сколько квадратов ω целиком уложилось в многоугольнике α. Пусть их будет k штук (на рис. 6 $k=5$). При этом останется часть многоугольника α, в которой не укладываются целые квадраты ω. Сосчитаем, сколько квадратиков ω_1 целиком уложилось на этой оставшейся площади. Пусть их будет k_1 штук.

Во вновь оставшейся части многоугольника α уложится k_2 штук квадратиков ω_2, и т. д. Так как $S(\omega)=1$; $S(\omega_1) = \frac{1}{10^2}$; $S(\omega_2) = \frac{1}{100^2}$; ..., то для удовлетворения свойств 1°—4° естественно считать, что площадь всего многоугольника α должна быть равна

$$\sigma(\alpha) = k + \frac{k_1}{10^2} + \frac{k_2}{100^2} + \frac{k_3}{1000^2} + \ldots \qquad (1)$$

Это суммирование будет, вообще говоря, бесконечным, но сумма никогда не сможет превзойти того числа квадратов ω, которыми можно с избытком покрыть весь многоугольник

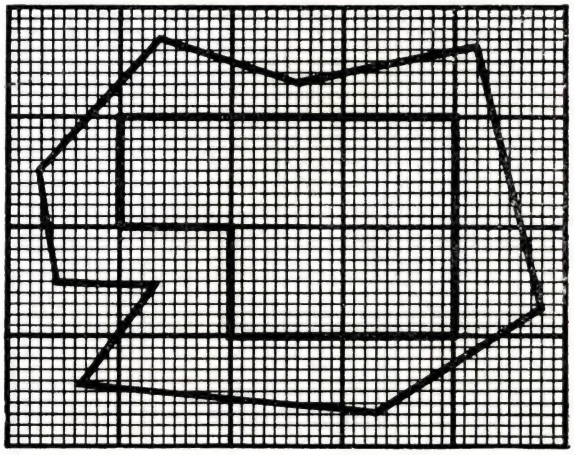


Рис. 6.

α (на рис. 6 многоугольник α вполне покрывается 20 квадратами ω).

Прямоугольник, изображенный на рис. 3, покрыт был именно такой сеткой. Там $k=6$, $k_1=182$, $k_2=k_3=\ldots=0$, и линии сетки параллельны сторонам прямоугольника. Если бы прямоугольник на рис. 3 покрыть той же сеткой, предварительно повернув ее на некоторый угол, то числа k, k_1, k_2, ... были бы другими. Спрашивается, будет ли и в случае повернутой сетки для прямоугольника сумма (1) все-таки равна $ab=7{,}82$?

Вообще, зависит ли результат квадрирования от положения сетки? Можно доказать (это делается довольно сложно), что при любом расположении сетки величина $\sigma(\alpha)$ суммы (1) будет одна и та же, т. е. результат квадрирования не зависит от положения сетки.

Итак, и процесс триангуляции всегда сопоставляет с многоугольником α некоторое число $S(\alpha)$, не зависящее от способа триангуляции, и процесс квадрирования сопоставляет с тем же многоугольником число $\sigma(\alpha)$, также не зависящее от способа квадрирования. Как числа S, так и числа σ удовлетворяют свойствам 1°—4°.

Возникает вопрос: совпадают ли между собой числа $S(\alpha)$ и $\sigma(\alpha)$, т. е. совпадают ли между собой результаты квадрирования и триангуляции? Можно доказать, что $S(\alpha)=\sigma(\alpha)$ для каждого многоугольника α. Более того, всякий другой процесс измерения, удовлетворяющий условиям 1°—4°, даст тот же самый числовой результат для каждого многоугольника, что и процессы, описанные выше. Этим завершается ответ на второй вопрос.

Отметим, что доказательства высказанных положений не совсем просты. Читателю может показаться, что все эти положения и так очевидны, и их вообще не надо доказывать: они многократно подтверждались на практике.

По этому поводу можно заметить следующее. Мы здесь строим геометрическую теорию измерения, задавая ей лишь основные свойства 1°—4° площадей, которые считаем аксиомами для построения теории площадей. (Напомним, что они вполне аналогичны свойствам-аксиомам 1°—4° длин!)

Сами аксиомы заимствованы из большого практического опыта. Выводы строгой теории, построенной на этих аксиомах, находят в свою очередь важнейшие практические применения.

Кроме того, практическая проверка утверждений, порой кажущихся совершенно очевидными, часто просто невыполнима. И может оказаться, что при увеличении точности измерений положения, ранее казавшиеся очевидными, оказываются просто неверными.

Укажем еще одну очень интересную и важную теорему, впервые доказанную независимо друг от друга венгерским математиком Бойай и немецким ученым Гервином и относящуюся к измерению площадей многоугольников:

Если два многоугольника α и β имеют одинаковую площадь, т. е. $S(\alpha)=S(\beta)$, то многоугольник α можно разрезать на конечное число многоугольников $\alpha_1, \alpha_2, \ldots, \alpha_n$, из которых можно сложить второй многоугольник β[1].

Так, например, на рис. 4 треугольник ABC разрезан на части, из которых составлен прямоугольник $BCNM$.

В заключение остановимся вкратце на измерении площадей фигур, ограниченных кривыми линиями. Отметим сразу, что этот вопрос следует решать не для какой-нибудь одной фигуры (например, круга), а для целого класса фигур подобно тому, как это делалось выше для широкого класса многоугольников. Это объясняется тем, что понятие площади не беспредметно — оно вызвано необходимостью найти численную характеристику для сравнения друг с другом различных фигур из некоторого определенного класса.

Рассмотрим фигуру α, ограниченную кривой линией (рис. 7). Многоугольник α_*, целиком содержащийся внутри фигуры α, назовем вложенным, а многоугольник α^*, содержащий внутри себя фигуру α, назовем окаймляющим фигуру α.

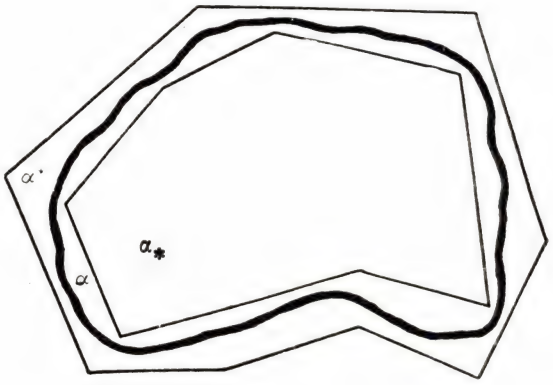


Рис. 7.

[1] Доказательство этой теоремы можно найти в небольшой, но очень содержательной книжке В. Г. Болтянского «Равновеликие и равносоставленные фигуры».

Условимся называть фигуру α квадрируемой, если для нее можно так подобрать вложенный и окаймляющий многоугольники α_* и α^*, чтобы их площади отличались между собой сколь угодно мало, т. е. чтобы разность $S(\alpha^*)-S(\alpha_*)$ была как угодно мала [1].

Если α — многоугольник, то в качестве α_* и α^* можно взять сам многоугольник α. Тогда $S(\alpha^*)-S(\alpha_*)=0$, и , следовательно, каждый многоугольник квадрируем. Можно доказать, что все фигуры, встречающиеся в прикладных вопросах техники, квадрируемы.

В школьном курсе, например, доказывается, что круг является квадрируемой фигурой. Там в качестве вложенных берутся вписанные, а в качестве окаймляющих — описанные правильные многоугольники.

Нетрудно понять, что фигуру, ограниченную кривыми линиями, нельзя разбить на конечное число треугольников и, следовательно, процесс триангуляции в изложенном выше виде не пригоден для отыскания площадей таких фигур. Зато здесь вполне применим описанный выше процесс квадрирования, для применения которого совершенно не требуется прямолинейность границы фигуры.

Можно поставить вопрос об определении площади, т. е. числовой характеристики $S(\alpha)$, для всех квадрируемых фигур. По-прежнему обязательно требование, чтобы числа S обладали свойствами 1°—4°. Можно доказать (это делается в курсах высшей математики), что задача измерения площадей для всего класса квадрируемых фигур однозначно разрешима в том же смысле, что и для класса многоугольников. Под $S(\alpha)$ понимают число, обладающее тем свойством, что можно указать многоугольники α^* и α_* такие, что $S(\alpha^*)$ и $S(\alpha_*)$ как угодно мало отличаются от $S(\alpha)$.

ИЗМЕРЕНИЕ ОБЪЕМОВ

Вопрос об измерении объемов еще более сложен, чем вопрос об измерении длин и площадей. Непосредственное сравнение двух тел с целью определения того, какое из них больше, чаще всего выполнить совершенно невозможно. Поэтому здесь сразу же приходится строить геометрическую теорию измерения объемов.

Как и выше, задача ставится следующим образом. Рассмотрим совокупность всех геометрических тел — многогранников,— каждое из которых ограничено конечным числом многоугольников. Такими телами являются, например, тетраэдр, икосаэдр, призма и т. п. Для всех этих многогранников, которые мы будем обозначать буквами α, β, ..., требуется найти числовую характеристику V, называемую объемом тела и обладающую следующими свойствами:

1°. $V(\alpha)>0$ для всех многогранников.

2°. Если многогранники α и β равны, то $V(\alpha)=V(\beta)$.

3°. Если многогранник α составлен из многогранников β и γ, то $V(\alpha)=V(\beta)+V(\gamma)$.

4°. Если многогранник ω представляет собой куб со стороной, равной единице, то $V(\omega)=1$.

Здесь точно так же, как и в случае измерения площадей, естественно поставить вопросы I и II, сформулировав их применительно к телам.

Для отыскания объемов многогранников следует, как и в случае измерения площадей, указывать измерительный процесс, который позволял бы сопоставить с каждым многогранником α число $V(\alpha)$, удовлетворяющее условиям 1°—4°.

Ситуация здесь во многом аналогична изложенной выше относительно площадей. Здесь также можно построить процесс триангуляции, состоящий в разбиении каждого многогранника уже, разумеется, не на треугольники, а на треугольные пирамиды. Объем многогранника в силу свойств 1°—4° естественно при этом считать равным сумме объемов треугольных пирамид, полученных при триангуляции. Здесь вновь следует доказывать, что полученные таким способом величины объемов обладают свойствами 1°—4° и что объем не зависит от способа триангуляции.

Основной трудностью в создании геометрической теории измерения объемов является доказательство того, что объем треугольной пирамиды равен одной трети произведения площади основания на высоту, т. е. вывод формулы объема треугольной пирамиды.

Для вывода формулы площади треугольника (см. стр. 97) нам удалось разрезать треугольник на куски, из которых можно составить прямоугольник. В случае треугольной пирамиды естественно попытаться разрезать ее на конечное число кусков, из которых можно было бы сложить прямоугольный параллелепипед.

Оказывается, что это сделать невозможно по той причине, что для многогранников несправедлива теорема, аналогичная теореме Бойай—Гервина для многоугольников.

[1] Что такое площадь многоугольника, мы уже знаем.

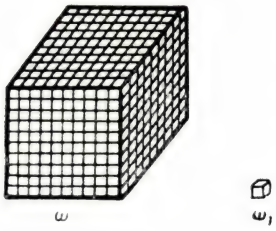


Рис. 8.

Можно доказать, что треугольную пирамиду невозможно разрезать на конечное число многогранников, из которых можно было бы сложить куб или призму. Доказательство этого факта читатель может найти в упомянутой выше книжке В. Г. Болтянского.

Именно этим и объясняется то, что вывод формулы $S(\Delta)=\frac{1}{2}ah_a$ для площади треугольника в школьном курсе проводится весьма просто — путем перекраивания треугольника в параллелограмм или прямоугольник, а формула для объема пирамиды выводится при помощи построения так называемой «чертовой лестницы» и предельного перехода.

Это более сложный путь, но в конце концов он приводит к отысканию формулы для объема пирамиды, а следовательно, и к полному обоснованию процесса триангуляции.

Кроме того, подобно процессу квадрирования плоских фигур, здесь можно построить процесс кубирования многогранников.

Для этого рассмотрим сначала куб ω со стороной, равной 1 (рис. 8). Разобьем каждую его сторону на 10 частей и через точки разбиения проведем плоскости, параллельные граням куба ω. Тогда куб ω разобьется на $10^3=1000$ равных кубиков ω_1. Ту же операцию проделаем с кубиком ω_1; он разобьется на 10^3 кубиков ω_2, и т. д. Так как $V(\omega)=1$, то, пользуясь свойствами 1°—3°, можно получить:

$$V(\omega_1)=\frac{1}{10^3};\ V(\omega_2)=\frac{1}{100^3};\ \ldots$$

Далее представим себе, что в пространстве, где размещен многогранник α, помещена кубическая решетка.

Подсчитаем, сколько кубов ω целиком поместилось в многограннике α. Пусть их будет k штук. Далее, пусть в оставшейся части многогранника α поместилось k_1 кубиков ω_1, и т. д.

Принимая во внимание свойства 1°—4°, объем многогранника α естественно считать, равным

$$V(\alpha)=k+\frac{k_1}{10^3}+\frac{k_2}{100^3}+\ldots$$

Можно доказать, что численные результаты процессов триангуляции и кубирования совпадают и что найденные при этом числа удовлетворяют условиям 1°—4°.

Получаемые здесь результаты вполне аналогичны результатам, указанным ранее для задач измерения длин и площадей.

Отметим еще, что аналогично задаче об измерении площадей криволинейных фигур можно формулировать задачу об измерении объемов тел, ограниченных кривыми поверхностями. Здесь необходимы рассуждения, подобные приведенным в конце раздела этой статьи, посвященного измерению площадей.

ГЕОМЕТРИЧЕСКИЕ ОТОБРАЖЕНИЯ

С разнообразными геометрическими отображениями (или преобразованиями) нам очень часто приходится встречаться в математике, технике и повседневной жизни. Что же это такое?

Для того чтобы уяснить сущность отображений (преобразований), рассмотрим несколько примеров.

Учитель в классе чертит на доске геометрическую фигуру, а ученики перерисовывают ее в свои тетради (рис. 1). В данном случае ученики воспроизводят в тетрадях сделанный учителем чертеж, т. е. отображают его на листах бумаги.

Лучи солнца, падающие на фигурную ограду, также дают небезынтересный пример отображения в виде тени, которая зачастую довольно причудливо искажает истинную форму и размеры ограды (рис. 2). Каждая точка A решетки заслоняет от солнечных лучей только одну точку A' поверхности земли. Таким образом, отображение переводит каждую точку A ограды (которую можно считать расположенной в вертикальной плоскости) в определенную точку A' земной поверхности (которую приближенно можно рассматривать как горизонтальную плоскость). Любое правило, по которому каждой точке A определенной фигуры (может быть, целой плоскости) или тела соответствует какая-то точка A' другой или той же самой фи-

гуры (или тела), дает нам отображение, или преобразование.

Итак, геометрическое отображение переводит каждую фигуру Φ в новую фигуру Φ'. При этом фигура Φ' может больше или меньше отличаться от исходной фигуры Φ.

Чертеж, перерисованный школьником из тетради товарища, может почти не отличаться от исходного; единственное различие между этими двумя чертежами то, что они находятся на разных листах бумаги. Значительно больше различия между чертежом, сделанными учителем на доске, и его копиями в тетрадях учеников. Однако и здесь сохраняется достаточное сходство чертежей: они отличаются лишь своими размерами. Это сходство столь велико, что учитель иногда может предложить учащимся точно воспроизвести в тетрадях его чертеж; иными словами, он считает различие в размерах чертежей несущественным и склонен признать одинаковыми разные по масштабам чертежи на доске и в тетради. Еще больше различия между оградой и ее тенью. Однако и здесь можно найти много общего между обеими фигурами. Тень от предмета, освещенного фонарем, больше отличается от самого предмета, чем его тень на солнце. Ведь лучи фонаря сходятся в одной точке, т. е. представляют собой расходящийся пучок, а лучи солнца можно считать параллельными, так как солнце находится очень далеко от освещаемого предмета. Фонарь может отобразить, например, круглый ободок автомобильных фар в совершенно непохожую на круг фигуру (рис. 3).

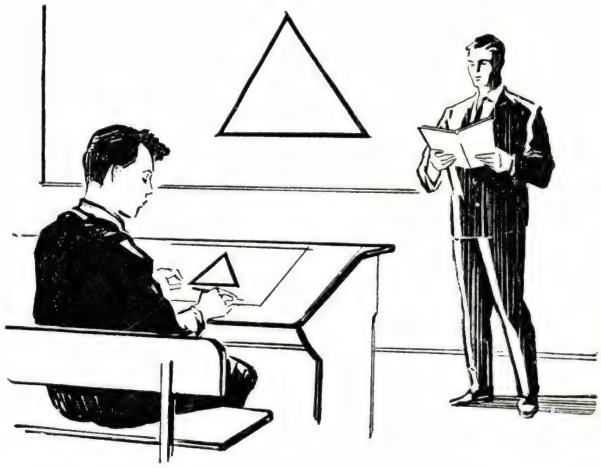


Рис. 1. Треугольник, нарисованный в тетради,— это отображение треугольника, изображенного на доске.

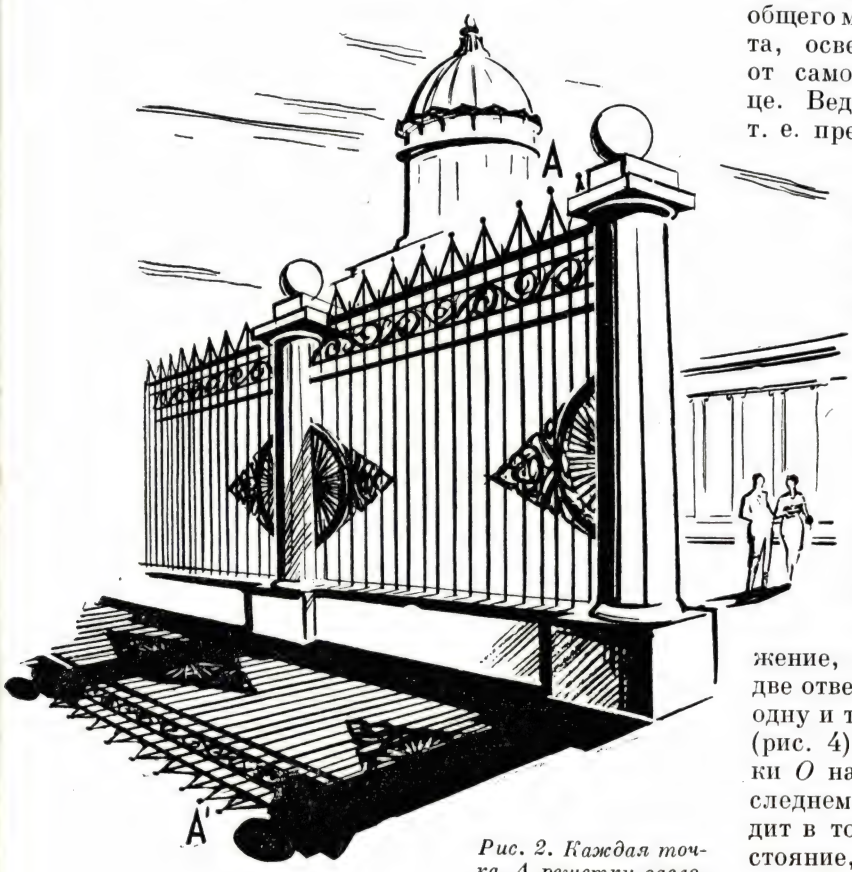


Рис. 2. Каждая точка A решетки заслоняет от солнечных лучей только одну точку A′ поверхности земли.

ДВИЖЕНИЯ И ОТОБРАЖЕНИЯ ПОДОБИЯ

Отображения, сохраняющие форму и размеры фигур и меняющие только их положение, называются движениями. В геометрии широко применяются так называемый параллельный перенос — такое движение, при котором все отрезки, соединяющие две отвечающие друг другу точки A и A', имеют одну и ту же длину, одно и то же направление (рис. 4) и вращение вокруг какой-то точки O на определенный угол φ. При этом, последнем, отображении каждая точка A переходит в точку A', удаленную от O на то же расстояние, что и A, и такую, что $\angle A'OA = \varphi$ (рис. 5). Вращение вокруг точки O на 180° называется симметрией относи-

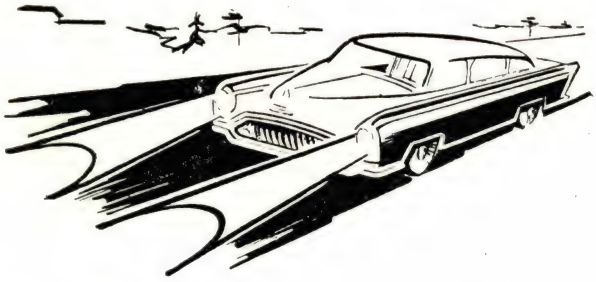


Рис. 3. Фонарь отображает круглый ободок автомобильной фары в совершенно непохожую на круг фигуру.

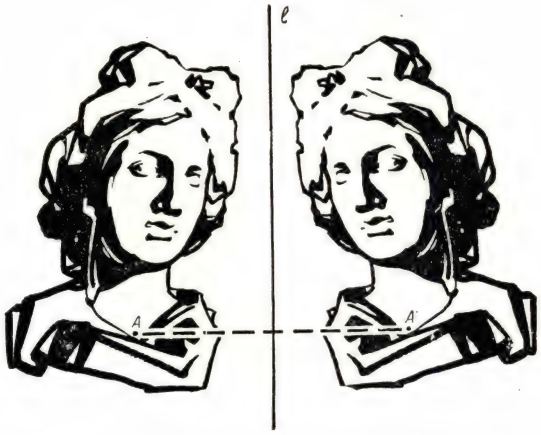


Рис. 6. Симметрия относительно прямой.

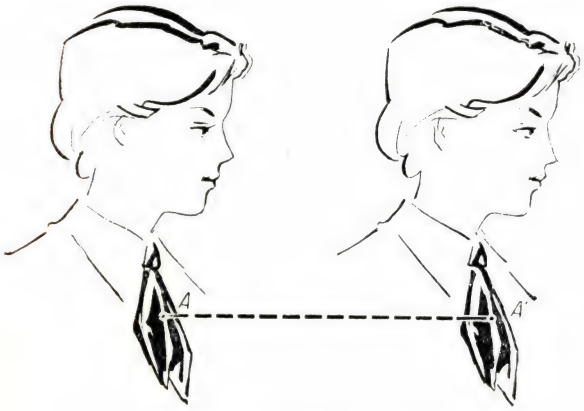


Рис. 4. Параллельный перенос.

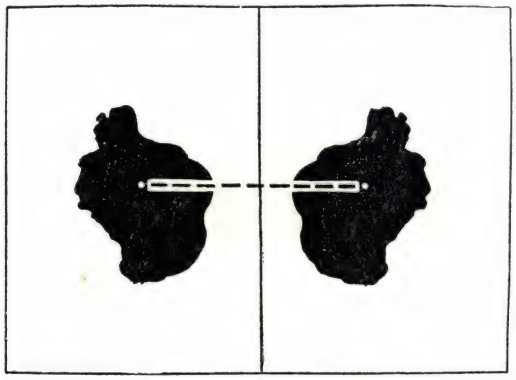


Рис. 7. Как можно получить симметричные кляксы.

Рис. 5. Вращение на угол φ.

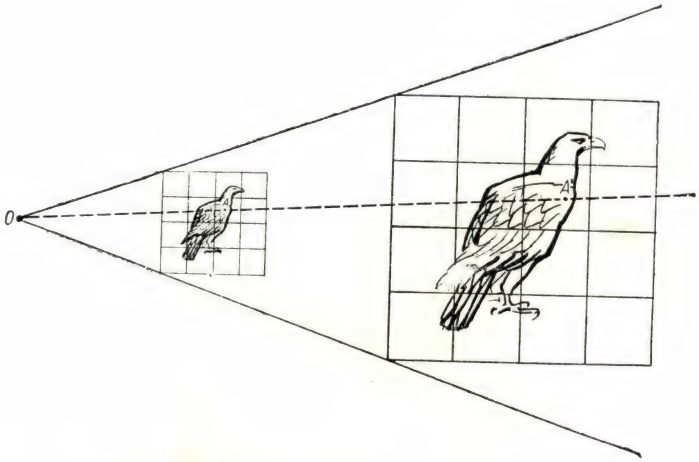


Рис. 8. Гомотетия с центром O.

тельно точки O; здесь каждая точка A переходит в такую точку A', что O есть середина отрезка AA'.

Другой интересный пример движения дает нам симметрия относительно прямой l, где каждая точка A переходит в такую точку A', что отрезок AA' перпендикулярен прямой l и делится этой прямой пополам (рис. 6). Каждый из нас может легко получить симметричные фигуры, сделав кляксу на листе бумаги и затем перегнув лист (рис. 7).

Отображения, меняющие только размеры фигур, но не форму, называются отображениями подобия. Наиболее известным примером такого отображения является сжатие к точке O, или гомотетия с центром O (рис. 8), при котором каждая точка A так перемещается по лучу OA, что расстояние ее от O умножается на постоянное число k (заметим, что при k, большем 1, это преобразование следовало бы называть не «сжатие к точке», а «растяжение от точки»).

Движения и преобразования подобия используются в геометрии именно потому, что они не меняют форму геометрических фигур. Пусть, например, мы должны построить (разумеется, циркулем и линейкой) треугольник, зная две его стороны AB и AC и медиану AM, заключенную между этими сторонами (рис. 9). Здесь нам даны три отрезка. Однако расположены они на чертеже крайне неудачно — все отрезки выходят из одной точки и не образуют никакого треугольника. Поэтому сначала мы можем не увидеть путей решения задачи.

Но нас может осенить удачная мысль — повернуть на 180° вокруг точки M изображенный на рис. 9 треугольник AMC. При этом точка C перейдет в точку B (ибо M — середина отрезка BC), а точка A — в такую точку A' прямой AM, что M будет серединой отрезка AA' (т. е. $AA'=2AM$), так что треугольник AMC займет новое положение $A'MB$. В результате этого преобразования мы получаем (рис. 10) треугольник ABA' с известными сторонами AB, $AA'=2AM$ и $A'B=AC$ (вращение на 180°, как и всякое движение, не меняет длину отрезков!). Построив этот треугольник, мы затем без труда построим исходный треугольник ABC.

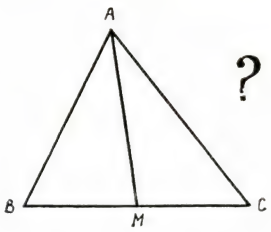


Рис. 9.

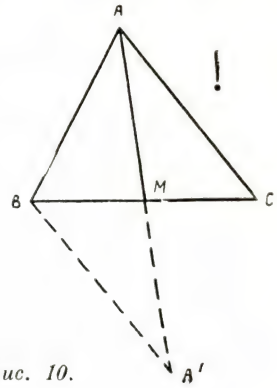


Рис. 10.

Вот еще одна задача: найти геометрическое место середин хорд окружности, проходящих через ее определенную точку M. Для решения этой задачи достаточно заметить, что преобразование, сопоставляющее концу A хорды MA ее середину A', есть гомотетия с центром M. А так как гомотетия не меняет форму фигур, то искомое геометрическое место также есть окружность (рис. 11).

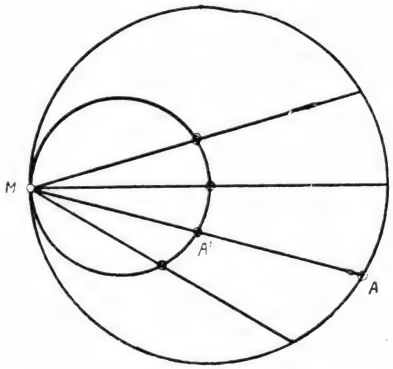


Рис. 11. Геометрическим местом середин хорд окружности, выходящих из одной точки M, есть также окружность.

Очень часто можно использовать для доказательства геометрических теорем симметрию относительно прямой. Так, например, можно быть уверенным, что прямая, соединяющая середины M и N оснований равнобедренной трапеции, проходит и через точку E пересечения диагоналей и через точку F пересечения боковых сторон (рис. 12). В самом деле, прямая MN, очевидно, является осью симметрии рис. 12, т. е. при симметрии относительно MN этот чертеж переходит в себя. Поэтому диагонали AC и BD обязательно пересекаются в точке E оси MN, ибо если бы это было не так, то симметрия относительно MN перевела бы E в другую точку — E', которая тоже принадлежала бы обеим диагоналям, а точка пересечения диагоналей может быть только одна. Точно так же можно показать, что точка F пересечения боковых сторон принадлежит оси симметрии MN.

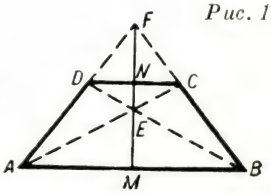


Рис. 12.

НЕКОТОРЫЕ БОЛЕЕ СЛОЖНЫЕ ОТОБРАЖЕНИЯ

А могут ли применяться в геометрии отображения, искажающие также форму геометрической фигуры (вроде показанного на рис. 2)? Если кроме того, что отображение меняет форму фигур, нам о нем ничего больше не известно, использовать его в геометрии, конечно, невозможно. Использовать определенное отображение в геометрических задачах можно, зная лишь, что́ оно сохраняет; иными словами, надо знать, какие свойства преобразованной фигуры Φ' совпадают со свойствами исходной фигуры Φ.

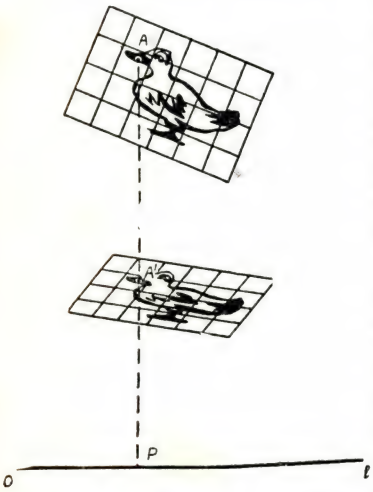


Рис. 13. Сжатие к прямой.

Чтобы проиллюстрировать это, остановимся на так называемых линейных преобразованиях, которые переводят прямые линии снова в прямые линии. К числу линейных преобразований относится и изображенное на рис. 2 параллельное проектирование, где каждая точка A некоторой плоскости π (плоскость ограды) переходит в такую точку A' другой плоскости π' (плоскость земли), что прямая AA' (солнечный луч) параллельна заданному направлению. К линейным преобразованиям относится также так называемое сжатие к прямой ol, переводящее каждую точку A в такую точку A' опущенного из A на прямую ol перпендикуляра AP, что расстояние $A'P$ точки A' от ol меньше (или больше) расстояния AP в постоянное число k раз (рис. 13; если $A'P$ больше AP, то уместнее было бы говорить о «растяжении от прямой ol»). Линейные преобразования переводят параллельные прямые в параллельные прямые и сохраняют отношения отрезков одной прямой (но не разных прямых!). В самом деле, нетрудно убедиться, что параллельное проектирование и сжатие к прямой обладают этими свойствами.

Воспользуемся теперь линейными преобразованиями, чтобы доказать теорему «Медианы треугольника пересекаются в одной точке». В школе эту теорему доказывают при помощи некоторых вспомогательных линий (но как догадаться, что именно эти линии надо провести?) и изучения полученной довольно сложной фигуры. В этом отношении теоремы о пересечении в одной точке биссектрис треугольника или перпендикуляров, восставленных к сторонам треугольника в их серединах, представляются значительно более простыми, так как их доказательство не требует проведения ни-

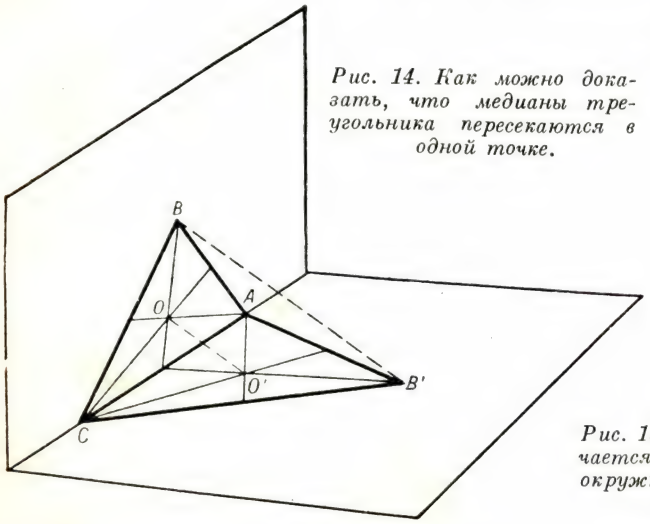


Рис. 14. Как можно доказать, что медианы треугольника пересекаются в одной точке.

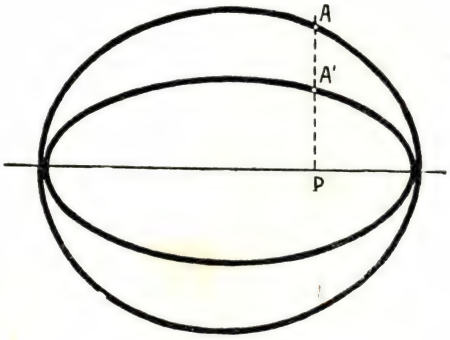
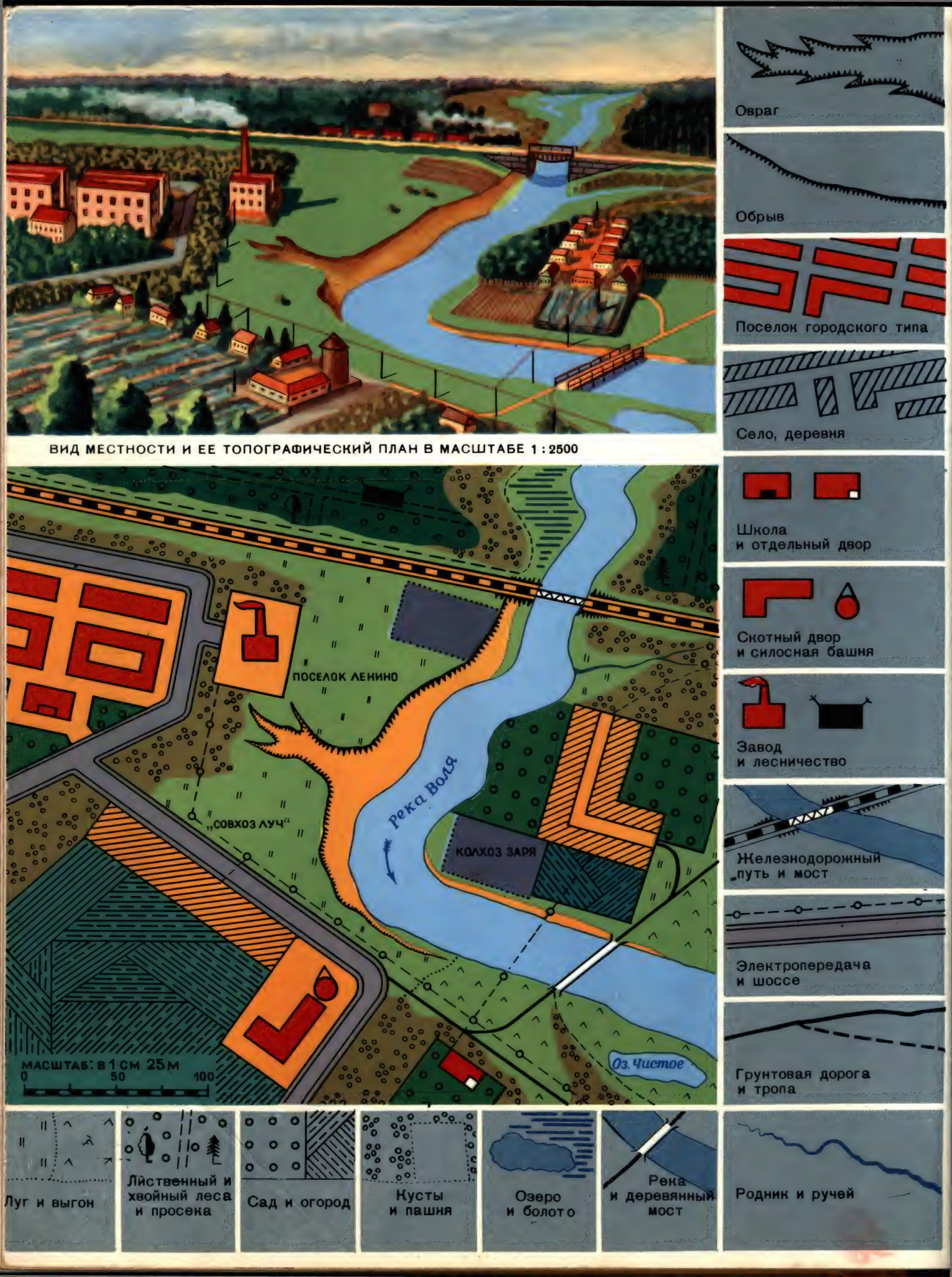


Рис. 15. Эллипс получается путем сжатия окружности к диаметру.

Таблица 4. Симметрия — пример геометрического отображения, очень часто встречающегося и в природе и в технике. На этом рисунке изображены веточка, цветок, самолет, гребной винт и другие тела, а также фигуры, получающиеся при ортогональном проектировании (еще один пример отображения!) этих предметов на плоскость (т. е. вид этих тел сверху). Легко видеть, что все эти тела и фигуры симметричны, т. е. переводятся в себя некоторой симметрией относительно прямой, точки или плоскости.


ВИД МЕСТНОСТИ И ЕЕ ТОПОГРАФИЧЕСКИЙ ПЛАН В МАСШТАБЕ 1 : 2500
ПОСЕЛОК ЛЕНИНО
„СОВХОЗ ЛУЧ"
Река Воля
КОЛХОЗ ЗАРЯ
Оз. Чистое
МАСШТАБ: в 1 см 25 м
0 50 100
Овраг
Обрыв
Поселок городского типа
Село, деревня
Школа и отдельный двор
Скотный двор и силосная башня
Завод и лесничество
Железнодорожный путь и мост
Электропередача и шоссе
Грунтовая дорога и тропа
Луг и выгон
Лиственный и хвойный леса и просека
Сад и огород
Кусты и пашня
Озеро и болото
Река и деревянный мост
Родник и ручей

каких новых линий. С помощью параллельного проектирования мы можем произвольный треугольник ABC преобразовать в равносторонний треугольник $AB'C$ (рис. 14); при этом медианы треугольника ABC перейдут в медианы треугольника $AB'C$ (ибо линейное преобразование переводит середину любого отрезка в середину преобразованного отрезка). Но так как медианы треугольника $AB'C$ пересекаются в одной точке O' (ибо они являются также биссектрисами или перпендикулярами, восставленными из середин сторон), то и медианы треугольника ABC пересекутся в одной точке O (именно в точке, которая проектируется в точку O'). Аналогично этому можно доказать, что медианы делятся в точке пересечения в отношении 2:1, считая от вершины (как?).

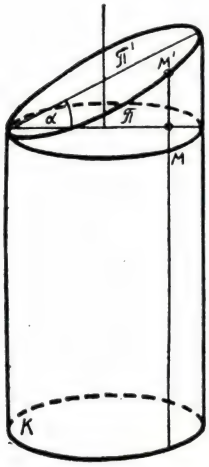


Рис. 16. Эллипс — сечение кругового цилиндра произвольной плоскостью.

Рассмотрим другой пример использования линейных преобразований — вывод свойств эллипса. Известно, что эллипсом называется кривая, в которую переводится окружность при сжатии ее к диаметру (рис. 15). Эллипс можно определить и как линию, получающуюся при сечении произвольной плоскостью кругового цилиндра (рис. 16); последнее определение означает, что эллипс образуется из окружности в результате параллельного проектирования (из плоскости π на плоскость π').

Докажем, например, что *геометрическим местом середин параллельных хорд эллипса является отрезок прямой.* Геометрическим местом середин параллельных хорд окружности служит перпендикулярная к этим хордам прямая (рис. 17, *а*). Поэтому и для эллипса аналогичное геометрическое место будет прямой линией (рис. 17, *б*). В самом деле, при сжатии или при параллельном проектировании параллельные хорды окружности переходят в параллельные между собой хорды эллипса и диаметр, делящий все эти хорды пополам, переходит в прямую, делящую пополам все хорды эллипса.

Заметим, что смысл использования линейных преобразований часто заключается в том, что они позволяют применить в более сложных случаях простые соображения, связанные с симметрией фигур. Так, при доказательстве теоремы об эллипсе мы сводили ее к теореме об окружности и пользовались тем, что любой диаметр окружности является ее *осью симметрии.* Так же и теорему о точке пересечения медиан треугольника мы сводим к той же теореме для равностороннего треугольника, где дело сильно упрощается из-за того, что этот треугольник — фигура очень симметричная (он имеет три оси симметрии). Аналогично этому можно доказать, например, что прямая, соединяющая точку пересечения диагоналей и точку пересечения боковых сторон произвольной трапеции, делит основания трапеции пополам (рис. 18): для доказательства достаточно, например, спроектировать треугольник ABF в равнобедренный и тем свести рис. 18 в симметричный рис. 12. Близки

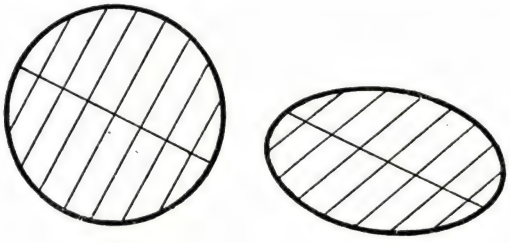


Рис. 17. Геометрическим местом середин параллельных хорд эллипса является отрезок прямой.

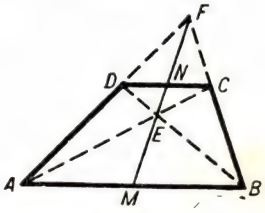


Рис. 18.

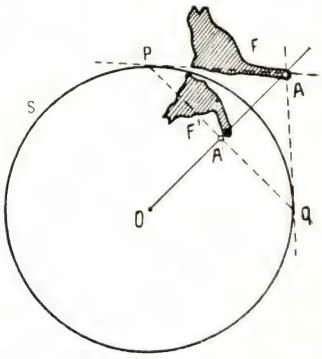


Рис. 19. Инверсия (симметрия относительно окружности).

Таблица 5. План и карта — это отображение какого-то участка земной поверхности на лист бумаги. На изображенном здесь плане можно найти точки, отвечающие углам фабричного здания, центру силосной башни и даже передним колесам паровоза (точнее, положению этих колес в изображенный на верхнем рисунке момент; через несколько минут паровоз будет находиться уже в другом пункте и положению его колес будут отвечать на плане другие точки).

к этому и пути использования в геометрии других типов преобразований (сравните, например, несимметричный рис. 20,*а* и симметричный рис. 20,*б* в конце статьи).

Наряду с линейными преобразованиями современная геометрия знает много других интересных преобразований. Подробно изучены, например, так называемые круговые преобразования, переводящие окружности в окружности. Примером кругового преобразования является инверсия, или симметрия относительно окружности S с центром O, при которой каждая точка A, внешняя по отношению к окружности S, переходит в точку A' пересечения прямой OA с хордой PQ, соединяющей точки прикосновения с S проведенных к ней из A касательных (рис. 19). Можно доказать, что каждую окружность инверсия переводит снова в окружность (или в прямую, которую можно считать «окружностью бесконечно большого радиуса»).

Знает геометрия и преобразования с еще более неожиданными свойствами.

ОТОБРАЖЕНИЯ КАК ОСНОВА КЛАССИФИКАЦИИ ТЕОРЕМ

Немецкий математик Феликс Клейн в конце прошлого столетия предложил положить геометрические преобразования (отображения) в основу классификации всех свойств геометрических фигур. Он предложил различать геометрические свойства по тем преобразованиям, которые эти свойства сохраняют. К одной группе при этом будут относиться те свойства, которые сохраняются лишь при движениях фигур; сюда относятся все свойства, связанные с расстояниями между точками. В другую группу попадут свойства, сохраняющиеся при преобразованиях (отображениях) подобия (например, все свойства, связанные с величинами углов); еще одну группу составят свойства, сохраняющиеся при линейных преобразованиях. Но так как линейные преобразования изменяют фигуры сильнее, чем движения, то свойства, сохраняющиеся при этих преобразованиях, следует считать более глубокими. С этой точки зрения свойство треугольника, выражаемое теоремой «Медианы треугольника пересекаются в одной точке», оказывается более глубоким, чем аналогичное свойство высот треугольника.

Такая классификация геометрических свойств поясняет то удивительное, казалось бы, обстоятельство, что искажающие фигуру отображения (вроде параллельного проектирования) могут быть использованы для доказательства относящихся к этой фигуре теорем. В самом деле, имеется значительное число таких свойств геометрических фигур, которые полностью сохраняются при параллельном проектировании; при доказательстве именно этих свойств мы и можем использовать проектирование. Так, выше мы уже отмечали, что при доказательстве теоремы о точке пересечения медиан треугольника можно без ограничения общности считать рассматриваемый треугольник равносторонним (ибо каждый треугольник можно спроектировать в равносторонний); это значительно облегчает доказательство теоремы.

В противоположность этому при доказательстве теоремы «Высоты треугольника пересекаются в одной точке» мы не имеем права считать треугольник равносторонним, ибо если мы спроектируем треугольник ABC в новый треугольник $AB'C$, то высоты ABC не перейдут в высоты $AB'C$.

В качестве еще одного примера можно рассмотреть следующую теорему: Если одна окружность (внешне) касается двух непересекающихся

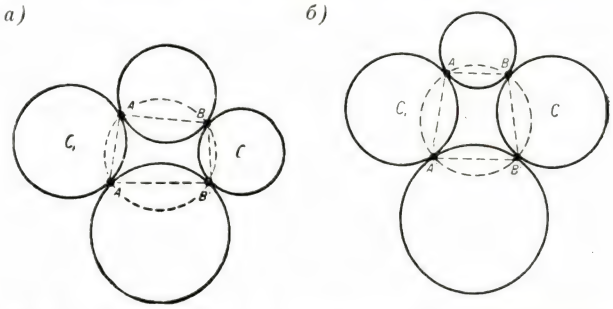


Рис. 20. Точки A, B, A', B' лежат на одной окружности.

окружностей C и C_1 в точках A и B, а другая окружность — в точках A' и B', то точки A, B, A' и B' лежат на одной окружности (рис. 20,*а*). Свойство окружностей, составляющее содержание этой теоремы, сохраняется при инверсии. Но инверсией можно любые две окружности перевести в равные окружности. Поэтому мы можем считать окружности C и C_1 равными, что делает нашу теорему почти очевидной (ибо четырехугольник $A'B'BA$ на рис. 20,*б* — равнобедренная трапеция).

Таким образом, точка зрения Клейна может помочь при отыскании путей доказательств тех или иных теорем геометрии.

О РАЗЛИЧНЫХ ГЕОМЕТРИЯХ

С ЧЕГО НАЧИНАЕТСЯ ИЗЛОЖЕНИЕ ГЕОМЕТРИИ

Раскроем учебник геометрии и рассмотрим определение какого-нибудь геометрического понятия, например трапеции. Пытаясь полностью его понять, мы сразу же обнаружим, что надо заранее знать определение параллельности прямых и определение четырехугольника, а для этого надо знать определение отрезка. Последнее требует знания того, что такое прямая и точка.

Всякое другое определение точно так же в конце концов приводит нас к тем же начальным понятиям: к прямой и точке или к прямой, точке и плоскости. Значит, точка, прямая и плоскость — основные геометрические понятия, и мы вправе надеяться найти соответствующие определения на первых страницах учебника.

Но, увы, нас ожидает разочарование. Оказывается, что и на первых страницах учебника нет точных математических определений точки, прямой и плоскости. В то же время все определения, опирающиеся на эти основные геометрические понятия, сформулированы с полной математической строгостью. Такое положение на первый взгляд может показаться весьма странным.

Правда, в начале учебника даются некоторые пояснения того, что же все-таки мы понимаем под точкой, прямой и плоскостью. Пояснения эти, однако, ни в какой мере не могут служить точными математическими определениями. Кроме того, эти пояснения нигде в доказательстве теорем не используются. Важным является лишь указание на то, что в дальнейшем будут изучаться именно точки, прямые и плоскости.

Что же такое точка, прямая и плоскость?

Прежде всего отметим, что нигде в природе не встречаются геометрические точки, прямые и плоскости.

Представим себе шарик малого диаметра, скажем 1 *мм*. Уменьшим его диаметр вдвое, втрое, в тысячу раз и т. д. Наступит ли момент, когда уже весьма малый шарик можно будет назвать точкой? Нет!

Учитель ставит на доске весьма «жирную» точку. Ученики рисуют в тетради тоже весьма крупные точки. На самом деле во всех этих случаях изображаются маленькие кружочки. Но точки ли это? Звезды на небе тоже нам представляются «точками», хотя некоторые из них во много раз больше Солнца.

А если представить себе шарик столь малым, что его нельзя увидеть ни в один современный микроскоп, будет ли это точка? Опять нет. Дело в том, что точка — это не какой-то конкретный предмет. Точка — это п о н я т и е, абстрактное понятие, которое образовано нашим сознанием в результате длительного наблюдения весьма малых (или кажущихся малыми при определенных условиях) реальных объектов — шариков, кружочков и т. п.

Это абстрактное понятие точки наделяется нами целым рядом свойств, общих для тех конкретных предметов, в результате наблюдения за которыми и возникло понятие точки.

Обратимся теперь к понятию прямой. На бумаге изображена линия. Прямая ли она? Как в этом убедиться? Надо приложить линейку, сравнить линию с краем линейки. Но при этом возникает вопрос: прямая ли наша линейка? Каждому, вероятно, приходилось видеть столяра, который для проверки прямизны выстроганной планки рассматривает ее так, как показано на рисунке (см. стр. 108). Если линейка не прямая, это будет хорошо видно на свет. Таким образом, проверяя прямизну сделанной линейки, ее сравнивают с лучом света. Точно так же обстоит дело и с туго натянутой нитью, которую практически считают прямой. Чтобы убедиться, что нить хорошо натянута и не провисает, надо опять-таки взглянуть вдоль нити, т. е. (как и планку) сравнить ее с лучом света.

Таким образом, понятие прямой линии мы заимствуем из природы при рассмотрении

лучей света. Но это заимствование не такое уж простое — ведь нигде в природе не встречается то, что мы называем «одним лучом света».

Допустим, что свет небольшого источника (рис. 1) пропускают сквозь малое отверстие. Получится узкий пучок света. Представим себе, что отверстие все время уменьшается и источник света тоже уменьшается. Тогда пучок, исходящий из отверстия, будет становиться все

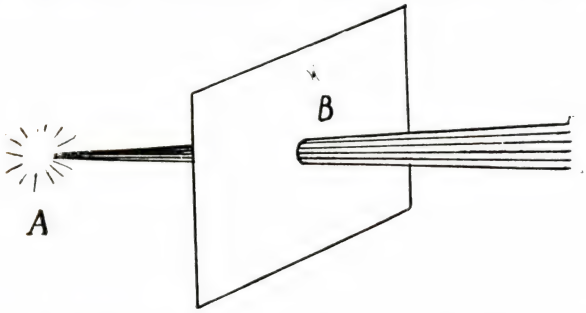


Рис. 1. Представление о прямой дает луч света, проходящий через малое отверстие.

у́же и у́же. Конечно, этот пучок никогда не станет лучом, если бы даже и можно было его сделать сколь угодно узким[1]. Вот если бы источник света *A* был точкой и отверстие *B* тоже было точкой — тогда бы пучок стал лучом. Но ведь мы говорили о том, что в реальном мире точек не бывает, следовательно, не бывает и лучей. Таким образом, и световой луч (т. е. прямая) является абстрактным понятием, хотя оно и связано с реальными явлениями и имеет физическое происхождение.

Рисуя на бумаге прямую, мы только создаем реальный образ — рисунок, стремясь в той или иной (нужной нам) мере сделать его похожим на те физические объекты, из которых произошло, выкристаллизовалось абстрактное понятие прямой.

[1] В этом мысленном, «идеальном» эксперименте мы умышленно не учитываем возникающих здесь физических явлений: дифракцию, преломление и т. п.

И здесь, как и в случае точки, абстрактное понятие прямой наделяется нами всеми свойствами, общими для тех конкретных предметов, в результате наблюдения над которыми возникло само понятие прямой.

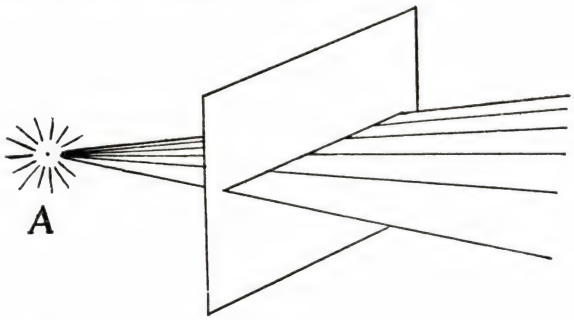


Рис. 2. Представление о плоскости дает свет, проходящий через узкую прямолинейную щель.

Точно так же обстоит дело и с плоскостью. Представим себе, что свет источника *A* пропускают сквозь «прямую» щель (рис. 2). «Прямизна» щели может быть в нужной нам мере проверена при помощи нашего «эталона» — луча света — так, как указано выше.

Получится изображенный на рисунке пучок света. Если бы удалось уменьшить размер источника до «идеальной» точки и сузить щель до «идеальной» прямой, пучок света стал бы «идеальной» плоскостью. Здесь применимы все рассуждения, приведенные выше при рассмотрении понятия прямой, и мы не будем на них останавливаться. Мы видим, таким образом, что основные геометрические понятия — точка, прямая, плоскость — возникают при рассмотрении весьма реальных вещей—лучей света, натянутых нитей, линеек и т. д. Как же теперь изучать свойства этих геометрических понятий? Быть может, надо на каждом шагу обращаться к свойствам лучей света и натянутых нитей, а каждую геометрическую теорему просто проверять построением? Нет, так делать нам не удастся! Ведь при создании геометрических понятий мы отвлекались от многих свойств реальных вещей: мы не учитывали дифракции и преломления света, провеса натянутой нити и ее толщины и т. д. Значит, хотя свойства геометрических объектов и отражают свойства реальных вещей, но это соответствие лишь приблизительное. Поэтому геометрическое утверждение надо доказать.

Но что, собственно, означают слова: доказать геометрическое утверждение?

ЧТО ТАКОЕ АКСИОМЫ

Каждому школьнику хорошо известно, как трудно понять смысл и полностью разобрать доказательство произвольно взятой теоремы школьного учебника геометрии, не изучив тщательно все изложенное в учебнике до этой теоремы. Каждая теорема опирается на предыдущие. Одна теорема цепляется за другую. И вот, если мы пойдем по учебнику геометрии от конца к началу, то в самом его начале найдем несколько утверждений, которые никак не доказываются, а принимаются за очевидные. Эти утверждения называются аксиомами. И, чтобы доказать геометрическое утверждение, его надо свести с помощью логических рассуждений к аксиомам.

Откуда же, однако, взялись сами аксиомы?

Геометрия изучает точки, прямые и плоскости. Как пояснялось выше, эти основные понятия геометрии должны обладать свойствами, присущими тем реальным предметам, наблюдение над которыми и дало человеку возможность создать указанные абстрактные понятия.

Именно эти свойства и должны быть исходными в формулировке аксиом.

Следовательно, аксиомы выражают свойства реальных, встречающихся в природе вещей: малых шариков, отверстий, узких пучков света и т. п.

Какие же свойства точек, лучей света принимают за аксиомы? Естественно, такие свойства, которые проверены человеческим опытом в течение тысячелетий, в которых мы не сомневаемся потому, что они многократно проверялись и подтверждались экспериментами. Эксперименты, положенные в основу формулировки аксиом, производились, разумеется, не над абстрактными понятиями точки, прямой и плоскости, а над вполне конкретными, реальными объектами: шариками, отверстиями, световыми «снопиками» и т. п. По мере того как эти реальные объекты становились в сознании человека понятиями точки, прямой, плоскости, выкристаллизовались и свойства прямых, точек и плоскостей, сформулированные впоследствии в виде аксиом.

Так были выявлены, например, следующие свойства точек и лучей (прямых):

1. Через всякие две точки можно провести прямую.

2. Через две данные точки нельзя провести две различные прямые.

3. На каждой прямой есть хотя бы две точки, и т. д.

Эти и некоторые другие утверждения в современной геометрии принимаются за аксиомы. Ими постоянно пользуются для доказательства различных теорем. При этом категорически запрещается пользоваться в процессе доказательства теорем даже совершенно очевидными на первый взгляд утверждениями, если они не содержатся среди аксиом.

Разумеется, сформулированные выше аксиомы — это далеко не полный перечень очевидных утверждений, проверенных опытом. Не вызывают сомнения, например, следующие утверждения:

1. В каждой точке данной прямой можно восставить к ней единственный перпендикуляр.

2. На каждой прямой имеется бесконечное множество точек, и др.

И все же эти положения доказывают, как теоремы, исходя из предыдущих аксиом. Нельзя все утверждения, кажущиеся верными, принимать за аксиомы, их должно быть по возможности немного. Если среди них встретилось бы утверждение, которое может быть доказано логически, исходя из предыдущих аксиом, то это утверждение незачем принимать за аксиому. Это уже теорема.

С другой стороны, аксиом должно быть и не очень мало. Этих аксиом должно быть достаточно для того, чтобы на их фундаменте можно было построить все здание геометрии и решать задачи, которые ставит перед ней практика. Первым пытался составить список аксиом геометрии великий греческий геометр Евклид (см. статью «Как возникла геометрия»). Однако его список аксиом был очень неполным, и на самом деле Евклид часто прибегал к чертежу, чтобы доказывать геометрические теоремы. Полный список геометрических аксиом дал в 1899 г. немецкий математик Д. Гильберт. В настоящее время насчитывают два десятка аксиом. Среди них есть и такие, которые в школе считают теоремами, например первый признак равенства треугольников.

Может возникнуть вопрос: почему те, а не другие предложения были приняты в качестве аксиом? Ведь можно было бы в качестве аксиомы взять, например, теорему о том, что в каждой точке прямой можно восставить к ней единственный перпендикуляр, но зато какую-нибудь из принятых аксиом уже доказывать, как теорему. Конечно, это так. Однако для нас это вопрос непринципиальный. Это дело исторического порядка, вопрос традиции, и мы оставим его в стороне.

При аксиоматическом построении геометрии на вопрос о том, что же такое точка, прямая и плоскость, мы можем ответить вполне определенно. *Это абстрактные понятия, которые обладают всеми свойствами, перечисленными в аксиомах.* Ничего другого о них сказать нельзя, да и не нужно. Ведь при доказательстве теорем ничем другим, кроме аксиом, не пользуются.

АКСИОМА О ПАРАЛЛЕЛЬНЫХ

Итак, мы выбрали систему аксиом и собираемся строить на ее базе всю геометрию. А выводы, полученные в геометрии в виде различных теорем, необходимы физикам, инженерам, производственникам для того, чтобы с их помощью определять величины, не поддающиеся непосредственному измерению. Но чем обширнее здание, тем прочнее должен быть фундамент. Поэтому ученые стали тщательно проверять прочность фундамента в геометрии — выяснять, полностью ли соответствуют геометрические аксиомы фактам реального мира. Первой была подвергнута проверке аксиома о параллельных.

Вы помните, конечно, такую теорему:

Две прямые, перпендикулярные третьей прямой, не пересекаются. (Ее легко доказать с помощью теоремы о внешнем угле треугольника.)

Дадим теперь следующее определение:

Две прямые, лежащие в одной плоскости и не пересекающиеся, называются параллельными.

Из только что указанной теоремы следует, что параллельные прямые существуют.

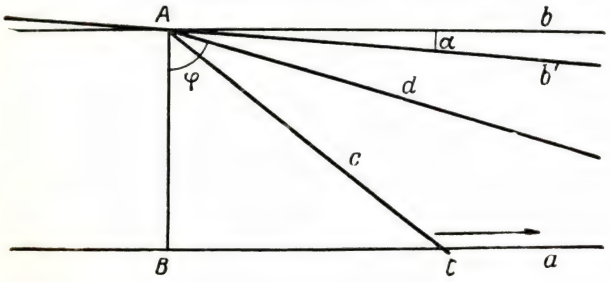


Рис. 3.

Пусть теперь на плоскости даны прямая a и точка A (рис. 3). Ясно, что через точку A можно провести прямую b, параллельную a. Для этого достаточно опустить из точки A перпендикуляр AB на прямую a, а затем из точки A провести прямую b, перпендикулярную AB. Это и будет искомая параллельная.

Теперь возникает вопрос, нельзя ли через точку A провести еще одну прямую — b', также параллельную прямой a. (Напомним, что все происходит в одной плоскости, т.е. мы занимаемся только планиметрией.) Тому, кто не думал над этим раньше, не изучал этого вопроса, хочется немедленно и категорически ответить: нет, нельзя — прямая b' пересечет прямую a; может быть, очень далеко, но пересечет!

Воздержимся пока от столь категорического ответа и постараемся вдуматься в поставленный вопрос глубже.

Возьмем на прямой a точку C и соединим ее с точкой A прямой c. Теперь будем передвигать точку C вправо по прямой a. При этом прямая c будет поворачиваться около точки A. Ясно, что прямая c никогда не сольется с прямой b, ибо b с a не пересекаются. Но прямая c, поворачиваясь в одном и том же направлении, будет неограниченно приближаться к какому-то определенному предельному положению, когда точка C неограниченно удаляется вправо. Теперь спросим себя: будет ли прямая b той предельной прямой, к которой неограниченно приближается прямая c? Или, может быть, прямая c будет неограниченно приближаться к предельной прямой b', отличной от b, так что прямая c, поворачиваясь, не сможет войти внутрь угла α? Опять хочется отвергнуть это предположение.

Однако подумаем еще. Проведем из точки A луч d под углом $\varphi < 90°$ к прямой AB. Если этот угол φ мал, прямые d и a пересекутся на чертеже. Надо только продлить луч. Если же теперь увеличить угол φ, прямые d и a пересекутся уже не на чертеже, а где-то вне книги. Еще немного увеличим угол φ. Тогда при продолжении прямые d и a будут пересекаться дальше, скажем на расстоянии нескольких сот метров. Ясно, что практически убедиться в этом весьма трудно, почти невозможно, но принципиально мыслимо.

Теперь еще увеличим угол φ. Пусть он отличается от 90°, допустим, на одну миллионную долю градуса. Что же теперь можно сказать о пересечении прямых d и a? Хочется опять их мысленно продолжить. Но так ли хорошо представляется это продолжение? Не теряет ли смысл этот мысленный эксперимент? Ведь продолжать прямые придется туда, куда не удавалось заглядывать даже при помощи самых мощных телескопов.

Предположение же о том, что лучи света a и d пересекутся за пределами видимости самых мощных телескопов, уже основаны на чистой фанта-

зии. Ведь неизвестно, как там поведут себя лучи света. Здесь уже нет никаких оснований ссылаться на эксперимент.

Таким образом, наш мысленный эксперимент не привел ни к какому результату,— быть может, при любом отличии угла φ от 90° прямые a и d пересекаются, но, возможно, есть такой маленький угол α, что эти прямые никогда не пересекутся, как бы долго мы их ни продолжали. Аксиома о параллельности совсем не так уж очевидна.

Разумеется, неочевидность какого-либо утверждения ни в какой мере не означает его несправедливости. Ведь теорема Пифагора, например, тоже не так уж очевидна: совсем не сразу можно поверить в то, что площадь квадрата, построенного на гипотенузе л ю б о г о прямоугольного треугольника, равна сумме площадей квадратов, построенных на его катетах. Чтобы убедиться в справедливости теоремы Пифагора для любого прямоугольного треугольника, ее доказывают. Доказательство это опять-таки основывается на тех же аксиомах.

Возможно, что аналогичное положение имеет место и в том случае, к которому относится наш вопрос. Иными словами, возникает вопрос, можно ли доказать, исходя из остальных аксиом, такое предложение:

(**А**). *Через точку вне прямой нельзя провести более одной прямой, параллельной данной?*

Возможно, что еще Евклид задавал себе этот вопрос, однако ответа на него у Евклида нет. Но так как этим предложением (или равносильным ему) приходилось пользоваться при доказательстве других теорем, пришлось принять предложение (**А**) за аксиому[1]. В школьном учебнике геометрии предложение (**А**) названо аксиомой о параллельных. Итак, пришлось принять новую аксиому, хотя, как объяснялось выше, она далеко не очевидна.

ПОПЫТКИ ДОКАЗАТЬ АКСИОМУ О ПАРАЛЛЕЛЬНЫХ

После Евклида многие математики в течение двух тысячелетий пытались доказать аксиому о параллельных, вывести ее, исходя из остальных аксиом евклидовой геометрии. Доказательства эти проводились методом от противного. Рассуждали примерно так. Предположим, что аксиома о параллельных неверна. Это значит, что через точку A вне прямой a можно провести хотя бы две прямые, не пересекающие a. Попытаемся привести это предположение к абсурду, к противоречию с другими аксиомами. Если такое противоречие обнаружить удастся, это значит, что наше предположение неверно, что верна аксиома о параллельных, т. е. она является теоремой, выводимой из других аксиом.

Однако, как ни остроумны были рассуждения, противоречие обнаружить не удавалось. Многим удавалось, отвергая аксиому о параллельных, получать утверждения, казавшиеся абсурдными. Например, оказалось, что если аксиома о параллельных неверна, то сумма углов треугольника не равна 180°, геометрическое место точек, равноудаленных от данной прямой, не является прямой линией, не существует подобных треугольников, неверна теорема Пифагора, и т. д. Получая такие странные, казавшиеся абсурдными результаты, многие математики считали, что этим они доказали аксиому о параллельных. Но все эти удивительные факты вовсе не свидетельствовали о логическом противоречии. Они противоречили сложившимся привычкам, но не противоречили друг другу.

Однако сложившиеся привычки являются результатом многочисленных опытов. Каждый из этих опытов проводился с некоторыми ошибками в измерении. Возник вопрос, нельзя ли, проведя очень точные опыты, убедиться в справедливости или ошибочности указанных «странных» утверждений. Оказалось, что и это не так просто. Например, как мы сейчас увидим, не так уж просто узнать, равна ли сумма углов треугольника 180°.

РАВНА ЛИ СУММА УГЛОВ ТРЕУГОЛЬНИКА 180°

Оставим пока в стороне вопрос о том, включать ли аксиому (**А**) в число аксиом геометрии.

Укажем лишь, что с помощью аксиомы (**А**) в школьном учебнике доказывается теорема:

(**В**). *Сумма внутренних углов любого треугольника равна 180° (или π радианов).*

Несколько сложнее доказывается обратная теорема:

Если сумма внутренних углов хотя бы одного треугольника в точности равна 180°, то справедлива аксиома о параллельных, т. е. через точку A невозможно провести в плоскости две прямые, не пересекающие данную прямую a, которая лежит в той же плоскости[1].

[1] Евклид в качестве аксиомы принял другое предложение, но оно равносильно предложению (**А**).

[1] Доказательство этой теоремы в школьном учебнике не приводится. Его можно найти, например, в книге Н. В. Ефимова «Высшая геометрия».

Таким образом, из аксиомы о параллельных следует, что сумма внутренних углов любого треугольника равна 180°; наоборот, из того, что сумма углов некоторого треугольника равна 180°, следует аксиома (**А**).

Значит, из списка аксиом евклидовой геометрии можно вычеркнуть аксиому о параллельных, но вместо нее внести в список аксиом предложение (**В**). При этом все остальные теоремы евклидовой геометрии остались бы неизменными.

Мы выше пояснили трудность (даже практическую невозможность) экспериментальной проверки аксиомы о параллельных с помощью световых лучей: если бы даже можно было выделить сколь угодно тонкий пучок световых лучей и если бы не было никакого поглощения световых лучей, то и тогда совершенно неведомым оставалось бы их поведение за пределами видимости в современные телескопы. Всегда неясным оставался бы вопрос о том, пересекутся ли лучи d и a, если угол φ близок к 90°.

Приняв аксиому (**А**), мы получим геометрию, в которой сумма углов любого треугольника равна 180°. Приняв предложение, противоположное аксиоме (**А**), мы получим геометрию, в которой сумма углов всякого треугольника отлична от 180°. Как же здесь быть? Принимать или не принимать аксиому (**А**)?

Ввиду чрезвычайных трудностей, связанных с экспериментальной проверкой аксиомы (**А**), в опытах со световыми лучами возникает вопрос о том, не проще ли на таких опытах проверить предложение (**В**).

Поясним подробнее возникающую здесь ситуацию.

Как нам уже известно, нигде в природе не встречаются точки, прямые и плоскости. Следовательно, в природе не бывает и отрезков, углов, треугольников. Мы постоянно наблюдаем лишь шарики, «снопики» лучей и т. п., которые мы с известным приближением считаем точками, прямыми и т. п. В геометрии же точки, прямые, отрезки, углы и т. п. являются абстрактными понятиями, которые возникли в результате длительного наблюдения как раз за шариками, снопиками, туго натянутыми нитями и т. п. Все выводы и теоремы геометрии применимы к изучению реальных объектов лишь в той мере, в какой эти объекты принимаются в каждом конкретном случае за точки, прямые, плоскости, т. е. с некоторым приближением.

Представим себе, что мы наблюдаем в телескоп какую-нибудь звезду. Пусть звезда наблюдается нами как точка. Разумеется, такое допущение зависит от точности наших наблюдений, от качества телескопа, размеров звезды и ее расстояния до наблюдателя. На самом деле эта звезда весьма больших размеров, но ее расстояние до наблюдателя очень велико. Ее изображение в окуляре мы считаем «точкой». Если бы звезда приблизилась к наблюдателю, ее изображение в окуляре увеличилось бы и наблюдатель уже не считал бы ее точкой. Если бы звезда еще больше удалилась от наблюдателя, он просто перестал бы ее видеть.

При этом наблюдатель считает, что свет от звезды, попадающий на сетчатку его глаза, идет по прямой. Эта «прямая» в действительности представляет собой «сноп», очень узкий вблизи наблюдателя, но весьма широкий вблизи звезды, где его толщина равна диаметру звезды. При всех этих обстоятельствах наблюдатель считает, что он имеет дело с прямой,

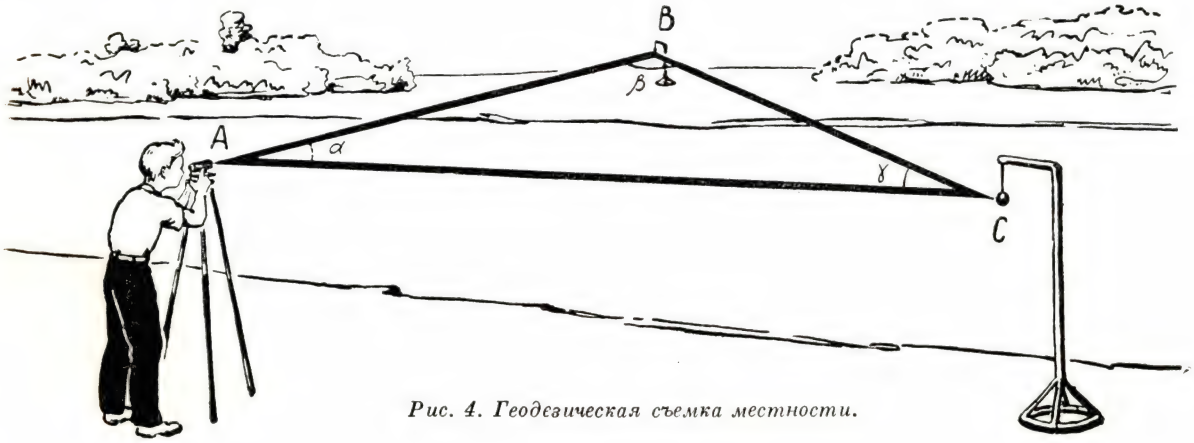


Рис. 4. Геодезическая съемка местности.

проходящей через две точки, одной из которых является звезда, а другой — ее изображение в окуляре телескопа.

Точно такое же положение имеет место не только в астрономических, но и в земных наблюдениях. Представим себе, что на местности (рис. 4) ведутся геодезические работы. Пусть в пункте B на штативе укреплен шарик, который геодезист наблюдает в обычный теодолит, установленный в пункте A.

Какой же величины надо взять шарик в пункте B для этих наблюдений? Шарик надо выбрать так, чтобы его изображение получилось с возможной точностью в центре окуляра теодолита. Если его изображение будет большим кружком, шарик надо уменьшить для более точной наводки. Но уменьшать шарик имеет смысл лишь до тех пор, пока это уменьшение сказывается на точности наводки теодолита. Выбрав шарик надлежащего размера, геодезист считает, что он имеет дело с «точками» A и B, соединенными отрезком AB. При этом, как и в примере со звездой, шарик B может на самом деле быть довольно большим (это зависит, разумеется, от расстояния AB).

Теперь представим себе, что в пункте C также установлен на штативе шарик надлежащих размеров. Поочередно наводя теодолит на шарики B и C, геодезист находит величину α, равную разности отсчетов на лимбе теодолита.

В геодезических работах невозможно все измерить непосредственно (на рис. 4, например, река мешает измерить расстояние AB), поэтому некоторые величины определяют не измерением, а путем расчета, основанного на использовании данных, полученных прямым измерением. Для расчета употребляют формулы и теоремы, которые дает геометрическая теория.

Однако, как указывалось выше, геометрия оперирует абстрактными понятиями точки, прямой, треугольника и т. д. Поэтому наш геодезист, выполнив вполне конкретный физический эксперимент с шариками и снопиками световых лучей, рассматривает абстрактный геометрический треугольник ABC и считает, что величина геометрического угла в вершине A равна α—разности отсчетов на лимбе теодолита.

Понятно, что величина α зависит от того, насколько хорошим и совершенным был примененный теодолит. Поэтому, применяя различные измерительные приборы, геодезист должен был бы каждый раз изучать несколько другой абстрактный треугольник ABC.

Представим себе для определенности, что конструкция теодолита не дает возможности фиксировать на лимбе показания, меньшие 10′. В таком случае, выполнив отсчет на лимбе после наведения на шарик B, говорят, что отсчет сделан с точностью до 10. То же самое относится и к наводке теодолита на шарик C.

Найдя разность отсчетов α, геодезист считает, что значение угла A в абстрактном треугольнике ABC отличается от α не более чем на $\pm 20'$. Применив более точные приборы, он мог бы получить для угла A другое значение, лежащее, однако, в пределах от $\alpha - 20'$ до $\alpha + 20'$.

Аналогично можно для углов B и C получить величины β и γ и найти сумму $\sigma = \alpha + \beta + \gamma$.

Возникает вопрос: равна ли эта сумма 180°? Вообще говоря, нет. Понятно, что такое совпадение маловероятно. Вспомним прежде всего, что каждая наводка теодолита выполнялась с точностью до 10′. Для определения σ теодолит пришлось наводить шесть раз. Поэтому применение более точного прибора могло бы привести к получению другой суммы, которая, однако, не выходит за пределы промежутка от $\sigma - 1°$ до $\sigma + 1°$.

Итак, выбор суммы углов рассматриваемого абстрактного треугольника зависит от точности проведенных измерений (в данном случае от точности примененного теодолита). В нашем случае геодезист вправе рассмотреть абстрактный треугольник, сумма углов которого отличается от найденной при измерении величины σ, но не более чем на 1°.

Здесь возникает другой вопрос: насколько измеренная сумма углов σ отличается от 180°? Превосходит ли это отличие 1°? Находится ли разность между 180° и σ в пределах точности примененных инструментов? Иными словами, может ли геодезист в данном случае рассматривать абстрактный треугольник с суммой углов 180°? Проанализируем возможные результаты измерения. Здесь имеются две возможности.

Первая возможность: в результате измерения получилась $\sigma = \alpha + \beta + \gamma$, отличие которой от 180° превосходит точность проведенных измерений (в данном случае 1°). В этом случае геодезист должен рассуждать примерно так. Река мешает измерить расстояние AB (см. рис. 4). Еще труднее прямым измерением определить площадь треугольника ABC. Для отыскания этих величин необходимы некоторые геометрические теоремы, связывающие неизвестные элементы треугольника с теми, величина которых определяется из опытных данных. Значит, необходимо построить такую геометрию, выводы которой давали бы возможность с необходимой точностью решать

многие практические задачи, подобные встретившейся здесь.

Мы уже начали строить такую геометрию на базе некоторой системы аксиом. Затруднение возникло в вопросе, включать ли в их число аксиому (**А**). Если бы мы приняли эту аксиому, в нашей геометрии сумма углов всякого треугольника была бы равна 180°. Проведенный же опыт показывает, что принятая точность измерения не согласуется с таким выводом. Это значит, что такая геометрия для нашего геодезиста недостаточно хороша. Выводы такой геометрии наш геодезист не смог бы применять в своей практике. Зная длину AC, углы β и γ, он не смог бы с необходимой точностью по известной теореме синусов определить длину AB, ибо теорема синусов справедлива лишь там, где сумма углов треугольника равна 180°. Точно так же он не смог бы с желательной точностью по известным из школьного курса формулам найти площадь треугольника.

Пришлось бы ему для практических потребностей строить геометрию, где аксиома (**А**) несправедлива и, следовательно, сумма углов треугольника не равна 180°.

Вторая возможность: сумма углов $\sigma=\alpha+\beta+\gamma$, полученная в результате измерения, отличается от 180° на величину, не превосходящую точности измерений (в данном случае 1°).

В этом случае геодезисту для практических нужд вполне пригодна геометрия, в которой сумма углов треугольника равна 180°. У него нет никаких оснований отвергать аксиому (**А**), а равно и предложение (**В**). Обычная евклидова «школьная» геометрия здесь оказывается весьма полезной, ее выводы приобретают большое практическое значение с точностью, принятой в измерениях нашего геодезиста.

Однако необходимо заметить, что геодезист и в этом случае не должен слишком пренебрежительно относиться к геометрии, где неверна аксиома (**А**) и где сумма углов треугольника отлична от 180°. Не исключена возможность, что и такая «странная» геометрия в будущем окажется ему полезной. Если все измерения геодезиста пока хорошо согласовывались с такой геометрией, где сумма углов треугольника равна 180°, то, может быть, в дальнейшем, увеличив точность приборов или измеряя углы значительно бóльших, космических треугольников, он столкнется с тем, что при новых измерениях обычная геометрия уже не будет описывать мир с достаточной точностью. И тогда понадобится совсем другая геометрия.

Подведем некоторые итоги. Если бы в каких-либо опытах получился первый результат, это означало бы, что геометрия, построенная с помощью аксиомы (**А**), не удовлетворяет наши потребности, что она недостаточно хороша. Необходимо строить другую геометрию, где аксиома (**А**) несправедлива.

Если же в опытах всегда получается второй результат, это означает только, что евклидова геометрия с аксиомой (**А**) *пока* нас вполне удовлетворяет. Но со временем, с увеличением точности наблюдений, возможно, понадобится и другая геометрия. Итак, вопрос заключается лишь в том, какая геометрия с большей точностью описывает реальный мир.

Вполне владея изложенными идеями, замечательный математик Н. И. Лобачевский уже в первой половине XIX в. имевшимися в то время астрономическими средствами измерил сумму углов весьма большого космического треугольника. За вершины были взяты две самые удаленные точки на эллиптической орбите Земли и одна из далеких звезд.

В результате измерения получилась величина, как и следовало ожидать, отличная от 180°, однако это отличие не выходило за пределы точности примененных инструментов. Таким образом, вопрос о том, какая геометрия точнее описывает реальный мир, остался открытым. Было неясно, понадобится ли вообще когда-нибудь геометрия, в которой не имеет места аксиома (**А**). Не является ли подобная геометрия бесполезным плодом фантазии?

ГЕОМЕТРИЯ ЛОБАЧЕВСКОГО

Н. И. Лобачевский в 1826 г. впервые построил и развил одну из возможных геометрий, где аксиома (**А**) не имеет места[1]. Геометрия Лобачевского основывается на тех же аксиомах, что и евклидова геометрия, за исключением аксиомы о параллельных, которая заменяется противоположным утверждением — аксиомой Лобачевского:

Через точку вне прямой в данной плоскости можно провести хотя бы две прямые, не пересекающие данную прямую.

Мы видели, что вопрос о том, какая геометрия — Евклида или Лобачевского — точнее описывает мир световых лучей, решается не так уж просто, хотя аксиома Лобачевского и кажется на первый взгляд парадоксальной.

[1] Подробно о жизни и деятельности этого замечательного ученого и гражданина можно прочесть в книге В. Ф. Кагана «Лобачевский».

Огромной заслугой Лобачевского было то, что он этот вопрос поставил. Но его идеи были столь необычны, что современники их не поняли.

ГЕОМЕТРИЯ КРИВЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ

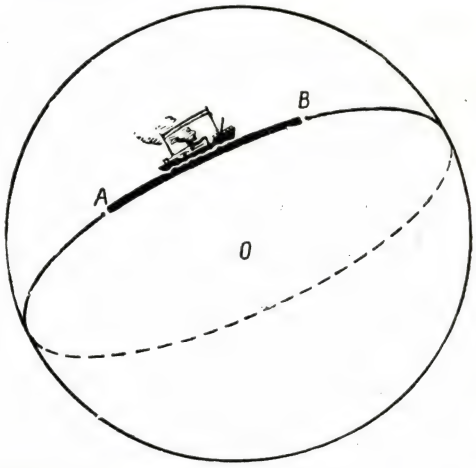
Многое в геометрии Лобачевского стало яснее, когда ученые хорошо ознакомились с геометрией кривых поверхностей. Чтобы пояснить, в чем тут дело, рассмотрим геометрию на шаре. Было время, когда люди думали, что Земля плоская. Позже, наблюдая за кораблями, уходящими за горизонт, они пришли к выводу о шарообразности Земли. Но для этого им пришлось рассматривать предметы (корабли), имеющие определенную высоту, поднимающиеся над поверхностью Земли. Возникает вопрос, нельзя ли убедиться в шарообразности Земли, проводя измерения непосредственно на земной поверхности, не поднимаясь над этой поверхностью и не рассматривая предметов, расположенных над поверхностью Земли.

Конечно, это легко сделать — ведь если двигаться по Земле в одном и том же направлении, то в конце концов мы вернемся на то же место, откуда вышли. Но для такой проверки нужно сделать целое кругосветное путешествие. А нельзя ли убедиться в шарообразности Земли, оставаясь все время на небольшом ее участке, скажем на острове? Оказывается, возможно. Для этого надо измерять геометрические фигуры на поверхности Земли. Возьмем на этой поверхности две точки — A и B. Эти точки можно соединить самыми различными линиями, не покидая нашего острова. Среди всех линий, соединяющих точки A и B, будет одна, имеющая самую маленькую длину. Мы, знающие, что Земля шарообразна, можем сказать, что́ это за линия — это дуга большого круга, соединяющего точки A и B. А вот человек, живущий на острове и не знающий о шарообразности Земли, назовет эту линию прямой, соединяющей точки A и B. После этого он возьмет три точки A, B, C и измерит углы треугольника ABC. Если остров очень маленький и точность его инструментов тоже мала, то он получит, что сумма углов этого треугольника равна 180°. Совсем другой результат получится, если остров велик или если инструменты у жителя этого острова очень точны.

Чтобы понять, в чем дело, рассмотрим такие три точки: за точку A выберем Северный полюс, за точку B — пересечение экватора с нулевым меридианом и за точку C — пересечение экватора с меридианом, имеющим долготу 90°. Если вы возьмете эти три точки на глобусе, то сразу увидите, что все три угла треугольника ABC равны 90°. Но ведь тогда сумма всех углов этого треугольника равна 270°. Можно доказать, что у любого треугольника на поверхности шара сумма углов больше, чем 180°, и этот избыток тем больше, чем больше площадь треугольника (потому-то для маленьких треугольников сумма углов почти равна 180°).

Таким образом, точно измеряя углы большого треугольника, можно убедиться, что мы живем не на плоскости, а на искривленной поверхности. С помощью еще более точных измерений можно получить представление и о форме поверхности.

Измерения, проведенные на шаре, можно проводить на любой другой поверхности. На любой поверхности есть линии, соединяющие две точки и имеющие меньшую длину, чем все остальные линии, соединяющие эти точки. Такие линии называют геодезическими. Измеряя углы треугольников, образованных геодезическими линиями, можно судить о степени искривленности поверхности. У некоторых кривых поверхностей (таких, как шар, эллипсоид) эта сумма получится больше 180°. У других, например у седла,— меньше 180°. А есть



Геодезическими линиями на сфере являются дуги большого круга. Геометрия, в которой за прямые принимаются дуги большого круга, называется сферической геометрией.

поверхности, у которых в некоторых местах сумма углов получится больше 180°, а в других — меньше 180°. Но чем больше будет отличие этой суммы от 180°, тем сильнее искривлен измеряемый треугольник. Есть такая поверхность (ее называют псевдосферой), на которой геодезические линии ведут себя так же, как прямые на плоскости Лобачевского.

Известный немецкий ученый Б. Риман ввел очень важное понятие, показав, что можно рассматривать не только искривленные поверхности, но и искривленные пространства. Искривленное пространство очень трудно себе представить — ведь когда мы говорим о кривой поверхности, то представляем себе эту поверхность лежащей в каком-то пространстве. А где же лежит кривое пространство? Дело в том, что в искривленности поверхности можно убедиться, не выходя за ее пределы, а измеряя углы в треугольниках на этой поверхности. Точно так же пространство следует считать искривленным, если сумма углов треугольников, взятых в этом пространстве, отличается от 180°.

КАКОВА ЖЕ ГЕОМЕТРИЯ НАШЕГО МИРА

Мы рассказали о различных геометриях. Естественно, возникает вопрос: какова же геометрия нашего мира? Этот вопрос сводится к вопросу: искривлено наше пространство или нет? Чтобы четко поставить этот вопрос, нужно еще сказать, какие линии в пространстве мы будем считать прямыми. Вспомним, что мы создали понятие прямой линии, рассматривая световые лучи в пустоте. Поэтому и сейчас мы назовем прямой, соединяющей две точки, световой луч, идущий в пустоте из одной точки в другую.

Теперь вопрос о том, какова геометрия нашего пространства, стал совсем определенным. Возьмем в пространстве три точки A, B, и C и рассмотрим треугольник, образованный световыми лучами, соединяющими эти точки. Будет ли сумма углов этого треугольника равна 180°? Ответ на этот вопрос был дан крупнейшим физиком XX в. А. Эйнштейном. Он создал теорию относительности, подтвердившую искривленность нашего пространства. По теории Эйнштейна, материальные массы искривляют окружающее их пространство. Теория относительности получила блестящее подтверждение на одном опыте, о котором мы сейчас расскажем. Этот опыт неоднократно повторялся астрономами и показал хорошее совпадение с заранее полученными выводами теории относительности.

Представим себе на Земле наблюдателя, который в определенный момент видит звезды

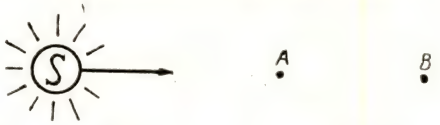


Рис. 5. Солнце движется в направлении к звездам A и B.

A и B и вблизи от звезды A Солнце S (рис. 5), движущееся «по небу» в направлении, указанном стрелкой[1]. Наблюдение проводится в небольшой промежуток времени, так что звезды A и B могут считаться неподвижными (их перемещение за это время столь незначительно, что не может быть обнаружено даже самым точным инструментом).

Нетрудно измерить скорость передвижения Солнца по небу. В малый промежуток времени она постоянна. Зная эту скорость и расстояние между Солнцем и звездой A, нетрудно подсчитать, в какой момент времени Солнце закроет эту звезду.

Точный опыт, однако, показывает, что в действительности звезда A закрывается Солнцем с некоторым опозданием, несколько позже рассчитанного времени. Звезда A еще видна в тот момент, когда по расчету Солнце должно было уже ее заслонить. Это явление было предсказано теорией относительности, лишь потом его удалось обнаружить экспериментально.

Как же это объясняется теорией относительности? Оказывается, сильное поле тяготения, образованное Солнцем, искривляет пространство вокруг него и меняет направление светового луча.

Поясним это подробнее. В начальный момент времени (рис. 6, I) Солнце не влияет на путь световых лучей, испускаемых звездой A, так как они далеки от Солнца. Луч a попадает в глаз наблюдателя, и он видит звезду. Луч a' не попадает в глаз наблюдателя. Когда же Солнце, создающее сильное поле тяготения, достаточно приблизится к лучам a и a', эти лучи будут как бы притягиваться к Солнцу. И, когда Солнце закроет от наблюдателя луч a, наблюдатель не перестанет видеть звезду, так как «притянувшийся» луч a' попадает в его глаз (рис. 6, II).

[1] Для земного наблюдателя Солнце движется «по небу». Кроме того, заметим, что этот опыт ставился при полном солнечном затмении.

Если в изображенные на рис. 6 моменты наблюдать еще звезду B и измерять угол α, то во втором случае он окажется меньше, чем в первом, так как в первом случае это угол между лучами a и b, а во втором — между a' и b.

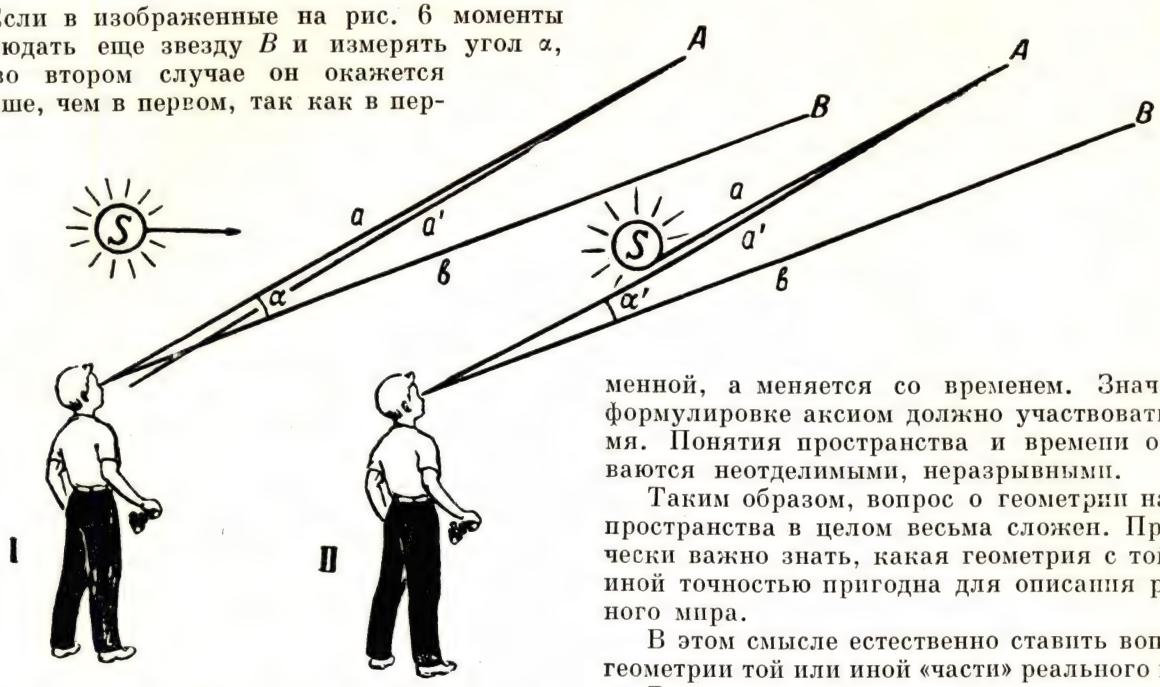


Рис. 6. Звезда А еще видна, хотя по расчетам она должна быть закрыта Солнцем.

Можно ли сказать, что луч a' сначала был прямым, а потом (вследствие тяготения Солнца) отклонился от прямолинейного пути, искривился? Нет, нельзя. Ведь мы назвали прямыми именно лучи света в пустоте. Каковы свойства лучей света — таковы свойства прямых. Луч a' и в первый и во второй момент оставался прямым.

Таким образом, дело не в том, что луч света искривился, а в том, что пространство вокруг Солнца под действием тяготения Солнца получило новые свойства, искривилось. Искривляют пространство и другие звезды. Да и маленькие тела тоже влияют на ход световых лучей, только, конечно, гораздо меньше, чем звезды.

Но все тела в природе находятся в непрестанном движении. Поэтому тело, искривлявшее в один момент пространство в одном месте, через некоторое время искривляет его в другом месте. Поэтому в разные моменты световые лучи ведут себя по-разному, и геометрии, описывающие их поведение в эти моменты, будут различны. Следовательно, геометрия, описывающая с определенной точностью наше реальное пространство (геометрия световых лучей), не остается неизменной, а меняется со временем. Значит, в формулировке аксиом должно участвовать время. Понятия пространства и времени оказываются неотделимыми, неразрывными.

Таким образом, вопрос о геометрии нашего пространства в целом весьма сложен. Практически важно знать, какая геометрия с той или иной точностью пригодна для описания реального мира.

В этом смысле естественно ставить вопрос о геометрии той или иной «части» реального мира.

Выше пояснялось, что, даже оставаясь в пределах ограниченной «части» своего мира, его обитатели, совершенствуя технику наблюдений, увеличивая их точность, могут прийти к выводу, что употреблявшаяся ими ранее геометрия уже недостаточно хороша и должна быть заменена новой. Открывая новые физические законы, уточняя их, они вынуждены также уточнять и применяемую ими геометрию. Мы видели выше, что эта «местная» геометрия зависит от сил тяготения, а значит, от распределения материи в рассматриваемой части пространства.

Две отвесные прямые пересекаются в центре Земли.

Итак, исследование космических вопросов привело к заключению о неевклидовости нашего пространства световых лучей.

Конечно, и при рассмотрении самых обычных земных вопросов зависимость простран-

ства от времени сохранится, пространство будет оставаться неевклидовым, но эта неевклидовость будет столь незначительной, что ею вполне можно (и должно!) пренебречь. Эта неевклидовость даже не может быть обнаружена нашими инструментами, как не мог человек на маленьком островке обнаружить искривленность Земли.

Евклидова геометрия сохраняет свое полное значение в вопросах практики, инженерной техники и т. п. Смешон был бы, например, инженер, который стал бы учитывать, что две вертикальные линии отвеса не параллельны, а пересекаются в центре Земли. Еще меньше оснований у инженера предполагать, что в построенном треугольнике сумма углов отлична от двух прямых.

Евклидова геометрия в таких вопросах с большой точностью описывает наш реальный мир, и не случайно изучение свойств пространства люди начали именно с евклидовой геометрии.

Все это, разумеется, ни в какой мере не умаляет важности неевклидовых геометрий. Они находят себе применение в важнейших теоретических и практических вопросах современной физики и математики.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

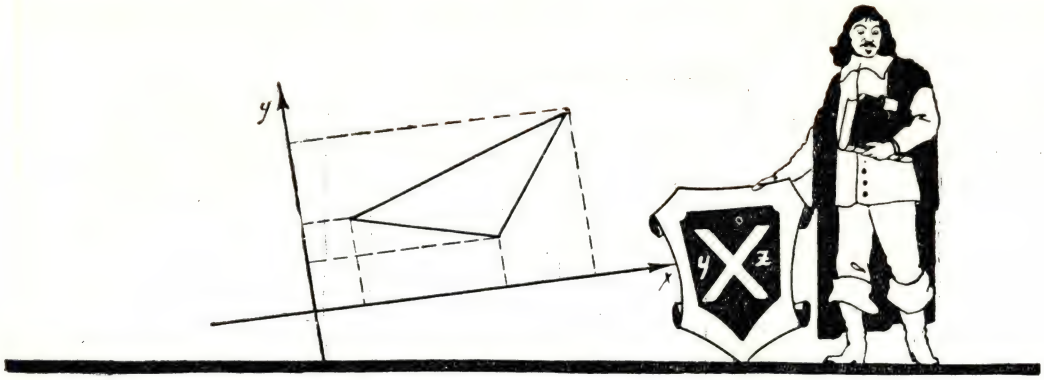
Геометрия Евклида служит человеку во многих областях его деятельности. Однако, расширяя ее сферу, человек неизбежно приходит к изучению неевклидовой геометрии. Впервые этот вывод сделал Лобачевский. Многовековая привычка к понятиям евклидовой геометрии не дала возможности даже крупным математикам, современникам Лобачевского, понять его идеи. Триумф этих идей наступил позднее. Теперь открытия Лобачевского прочно вошли в науку о природе и хорошо известны каждому физику и математику.

На стр. 107 говорилось о том, что под точкой, прямой и плоскостью в геометрии понимают абстрактные понятия, которые обладают свойствами, перечисляемыми в аксиомах.

Аксиомы же, о которых шла речь выше, выбирались так, чтобы они с нужной точностью характеризовали поведение пучков световых лучей в нашем реальном физическом пространстве.

Этим устанавливается тесная связь между геометрией и физическими явлениями, происходящими в реальном мире. При этом следует иметь в виду, что геометрия применима не только к изучению явлений, связанных с распространением света. Можно рассмотреть и какие-нибудь другие физические объекты, не имеющие никакого отношения к распространению света. Некоторые из этих объектов можно принять за эталон прямизны подобно тому, как это делалось выше с узкими снопиками световых лучей. Можно, например, в качестве эталона прямизны принять траектории твердых тел достаточно малого размера, движущихся по инерции, т. е. при отсутствии воздействия на эти тела внешних сил.

Эта геометрия (как и геометрия, полученная выше при рассмотрении световых лучей) будет лишь в первом приближении строиться на аксиомах Евклида.



Уравнения и функции

КАК ЛЮДИ УЧИЛИСЬ РЕШАТЬ УРАВНЕНИЯ

От периода между концом второго тысячелетия и началом нашего летосчисления история сохранила один из самых древних письменных памятников математики — «Наставление, как достигнуть знания всех темных (трудных) вещей... всех тайн, которые скрывают в себе вещи... писец Ахмес написал это... со старых рукописей...» (часть заглавия оторвана). Это — египетский сборник задач, который носит название «Папируса Ахмеса» (иногда его называют и «Папирусом Райнда», по имени английского собирателя древностей, который приобрел этот документ в середине прошлого века).

В папирусе Ахмеса содержится ряд задач, которые мы решаем при помощи уравнений первой степени. Египетский автор решает их способом, который в течение нескольких тысячелетий употреблялся разными народами для решения подобных задач и который называется «методом ложного положения».

Это есть тот же метод предположения, который на уроках арифметики применяется и в наше время.

Египтяне за 2000 лет до н. э. имели для обозначения неизвестного особый символ и название; последнее произносится «хау» или «аха» и условно переводится словом «куча».

Вот одна из задач «Папируса Ахмеса».

«Куча. Ее седьмая часть, ее целое. Что составляет 19». Это значит: требуется найти число, которое, будучи сложенным с его седьмой

частью, даст в сумме 19. Иными словами, требуется решить такое уравнение:

$$x+\frac{x}{7}=19.$$

На рисунке изображено египетское решение задачи.

Смысл этого решения таков.

Предположим, что «куча» есть 7; тогда $\frac{1}{7}$ будет 1 (см. первый столбец). Звездочки означают, что эти числа соответствуют смыслу задачи.

При сделанном предположении правая часть решаемого уравнения равнялась бы восьми (7+1), поэтому во втором столбце стоит число 8. Оно меньше требуемого задачей числа 19. Автор в уме удваивает его и получает 16. Дальнейшее удваивание дало бы 32, но это превышает требуемое задачей число 19, и в решении отмечается поэтому звездочкой число 16 как долженствующее войти в искомое решение. Не хватает еще 19—16=3. Автор пробует взять $\frac{1}{2}$ от 8, т. е. 4. Эта доля предположенного числа не может войти в искомое решение, так как надо добавить лишь 3. Тогда решающий берет $\frac{1}{4}$ и $\frac{1}{8}$ от 8, т. е. 2 и 1, и отмечает их звездочками, как составляющие вместе с 16 число 19.

Таким образом, автор установил во втором столбце решения, что первоначально предположенное значение для «кучи» надо взять $2+\frac{1}{4}+\frac{1}{8}$ раз, чтобы удовлетворить условию задачи. Остается 7 умножить на $2+\frac{1}{4}+\frac{1}{8}$ (египтяне, как и многие другие народы, знака «плюс» при сложении не ставили; мы тоже в смешанных числах пишем $3\frac{1}{4}$ вместо $3+\frac{1}{4}$). Автор решения вместо умножения 7 на $2\frac{1}{4}\frac{1}{8}$ умножает $2\frac{1}{4}\frac{1}{8}$ на 7. Для этого в третьем столбце он записывает число $2\frac{1}{4}\frac{1}{8}$, затем удвоенное (..) и учетверенное (....) значения его. Эти три числа складываются, и получается для «кучи» значение $16\frac{1}{2}\frac{1}{8}$. К нему прибавляется $\frac{1}{7}$ «кучи», т. е. $2\frac{1}{4}\frac{1}{8}$, и это дает в результате 19.

МЕТОД ДВУХ ЛОЖНЫХ ПОЛОЖЕНИЙ

В дальнейшем у разных народов (в Китае, Индии) был создан метод двух ложных положений, для которого арабы дали правило, применявшееся даже в XVIII в. (приведенное, между прочим, Леонтием Филипповичем Магницким в его «Арифметике»). Вот пример решения Магницким задачи по способу двух ложных положений.

З а д а ч а. Отец ученика спросил учителя, сколько у того учится ребят. Учитель ответил, что если бы у него было учеников еще столько, сколько сейчас есть, и полстолька, и четверть столька, и сын спрашивающего, то их было бы ровно 100 человек.

В нашем понимании задача сводится к решению уравнения

$$x+x+\frac{x}{2}+\frac{x}{4}+1=100.$$

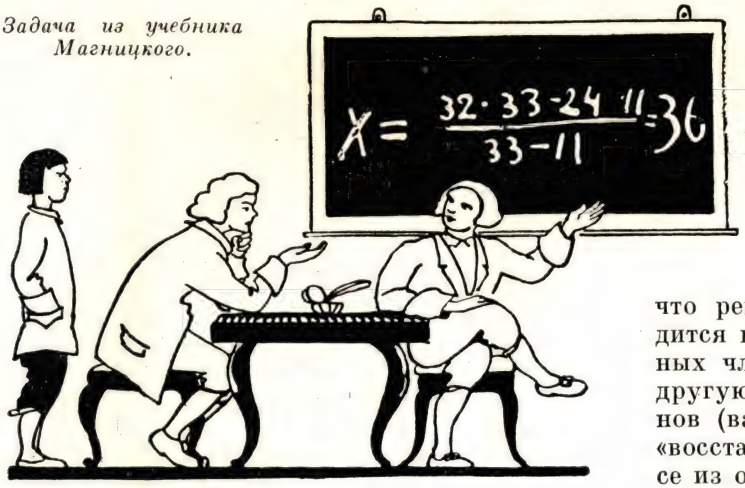
Р е ш е н и е п о М а г н и ц к о м у. Предположим, что учеников было 24. Тогда согласно условию имели бы 24+24+12+6+1=67, т. е. на 100—67=33 меньше требуемого.

Делаем второе предположение: учеников было 32; тогда 32+32+16+8+1=89, т. е. на 100—89=11 меньше требуемого. На основании веками выработанного правила Магницкий указывает готовый способ нахождения x:

$$x=\frac{32\cdot 33-24\cdot 11}{33-11}=36.$$

Если при одном предположении получится больше, а при другом — меньше, чем требует условие задачи, то в формуле, по которой вычисляется x, вместо знака «минус» надо поставить знак плюс. Например, пусть первое пред-

Задача из учебника Магницкого.



положение 60. Тогда $60+60+30+15+1=$ $=166$, $166-100=66$ (избыток); пусть второе предположение 20. Тогда $20+20+10+5+1=$ $=56$, $100-56=44$ (недостаток). В таком случае:

$$x=\frac{60\cdot 44+20\cdot 66}{66+44}=36$$

ВВЕДЕНИЕ ПОНЯТИЯ НЕИЗВЕСТНОГО ЧИСЛА

Важным этапом в развитии учения об уравнениях является введение понятия неизвестного числа и символа для его обозначения. Это — «куча» с особым символом для ее обозначения у египтян и соответственно другие названия и обозначения у вавилонян, китайцев, индийцев, древних греков, таджиков и других народов. У европейских народов систематическое обозначение неизвестного числа буквами x, y, z устанавливается в средние века и окончательно закрепляется в XVI—XVII вв. в работах Виета и Декарта.

Способы решения уравнений первой степени, основывающиеся на свойствах арифметических действий, развивались у разных народов в течение ряда веков. Основными приемами при этом были: перенос членов уравнения из одной части равенства в другую с противоположным знаком и приведение (соединение) подобных членов. Первый из этих приемов требовал понятия отрицательного числа, которое возникло значительно позже той эпохи, когда человек стал решать задачи, приводящиеся к уравнению первой степени. Вследствие этого уравнению придавали такой вид, чтобы все его члены были положительными, и давали специальные правила для разных видов уравнений с положительными членами. Среднеазиатский математик Мухаммед ал-Хорезми в IX в. ясно установил, что решение уравнения первой степени сводится к двум операциям: к переносу отдельных членов его из одной части равенства в другую (алджебр) и приведению подобных членов (валмукабала). Слово «алджебр» означало «восстановление», т. е. превращение при переносе из одной части уравнения в другую отрицательного члена (который в то время не имел смысла) в число (положительное). Название «алджебр» (aljebr) превратилось в слово «алгебра», употребляемое всеми народами. Ал-Хорезми широко применял уравнения для решения практических задач «различного рода и сорта» (общим приемом), что впоследствии способствовало установлению у европейских народов взгляда на начальную алгебру как на общую,

[1] Правило, применяемое для вычисления x, легко обосновать (см. И. Я. Депман, Рассказы о математике, Детгиз, 1954).

или универсальную, арифметику (Ньютон, Эйлер). Для начальной алгебры, изучаемой в школе, этот взгляд остается в силе и в наше время.

Из греческих математиков способами решения уравнений первой степени, по-видимому, владел Диофант (III в. н. э.), но часть его книги о решении уравнений первой степени до нас не дошла. Способы записи уравнений, для нас кажущиеся естественными и простыми, окончательно выработались лишь в XVII в. (Виет, Харриот, Декарт), а знак равенства и скобки вошли во всеобщее употребление даже в XVIII в. Скобки ввел Эйлер.

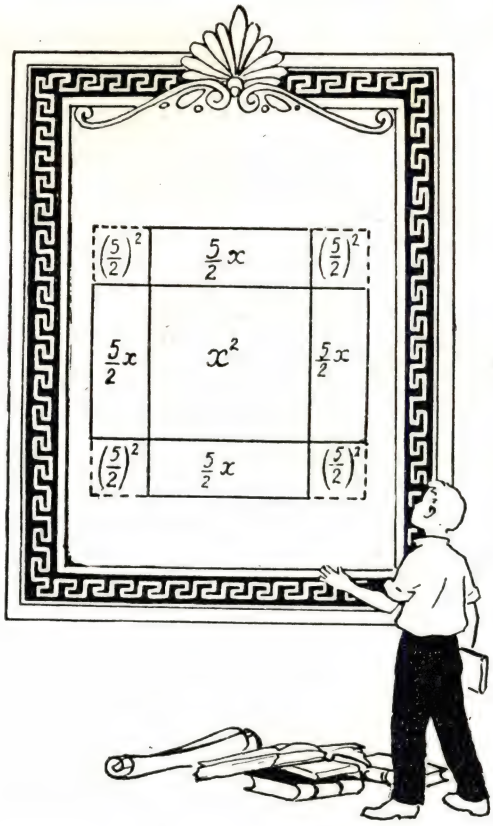
Способы решения систем уравнений первой степени появляются сначала в Индии, Китае, у арабских народов; в Европе — с XIII в. (Леонардо Пизанский — XIII в., Пачиоли — XV в., Штифель — XVI в.). Сначала появился способ сложения и вычитания, а затем и другие (подстановки, сравнения). У Ньютона в его лекциях, изданных в 1707 г., применяются уже все эти способы.

КВАДРАТНЫЕ УРАВНЕНИЯ

Уравнения второй степени умели решать еще вавилоняне во втором тысячелетии до н. э., но их знания в этом вопросе не оказали влияния на развитие европейской науки, так же как и достижения других восточных народов, долго остававшиеся в Европе неизвестными. Греческие математики решали квадратные уравнения геометрически: Евклид — делением отрезка в среднем и крайнем отношении; Герон, Диофант — приемами, по существу совпадающими с нашими способами. Индийские и китайские математики рассматривают отрицательные корни квадратного уравнения с первых веков нашей эры, но индийский математик Бхаскара еще в XII в. отмечает, что люди отрицательных корней не одобряют.

Заслуги в развитии учения о квадратных уравнениях имеет уже упомянутый среднеазиатский математик ал-Хорезми. Он дает вывод формулы решения квадратного уравнения, который излагается доныне во многих учебниках. Ал-Хорезми решает уравнение $x^2+10x=39$ (задача 7 его сборника) следующим образом.

Пусть искомое x есть сторона квадрата. Построим на каждой стороне квадрата прямоугольники с шириной, равной четверти коэффициента второго члена уравнения, т. е. $\frac{10}{4}=\frac{5}{2}$. Площадь



Так рассуждал ал-Хорезми при решении квадратного уравнения.

четырех прямоугольников равна $\frac{4\cdot 5}{2}x=10x$.

Площадь образовавшейся крестообразной фигуры равна x^2+10x, т. е. левой части данного уравнения. Дополним эту фигуру четырьмя квадратами по углам до квадрата со стороной $x+5$. Площадь образовавшегося большого квадрата $(x+5)^2$. Ее мы получили, добавив к крестовидной фигуре с площадью x^2+10x площади 4 квадратов со стороной $\frac{5}{2}$, т. е. $4\left(\frac{5}{2}\right)^2=25$. Имеем:

$$(x+5)^2=39+25=64, \quad x+5=\pm 8,$$
$$x=-5\pm 8, \; x_1=3, \; x_2=-13.$$

При буквенных обозначениях для уравнения $x^2+px=q$ имеем:

$$\left(x+\frac{p}{2}\right)^2=q+\frac{p^2}{4}, \; x+\frac{p}{2}=\pm\sqrt{\left(\frac{p}{2}\right)^2+q},$$
$$x_{1,2}=-\frac{p}{2}\pm\sqrt{\left(\frac{p}{2}\right)^2+q}.$$

В Европе формулами решения квадратных уравнений различных видов владел Леонардо

Пизанский в начале XIII в.; владели ими и позднейшие математики. Вывод формулы в общем случае имеется у Виета, но и Виет признает только положительные корни. Итальянские математики XVI в. (Кардано, Тарталья, Феррари, Бомбелли) присоединяют к положительным корням не только отрицательные, но и мнимые, и с этого периода способ решения квадратных уравнений достигает современного вида.

УРАВНЕНИЯ СТЕПЕНИ ВЫШЕ ВТОРОЙ

К уравнениям третьей степени пришли греческие математики (Гиппократ, Архимед и др.) при решении геометрических задач (удвоение куба — нахождение ребра куба, имеющего двойной объем данного куба; трисекция произвольного угла — деление на три равные части — и другие). Геометрическое решение этих задач столкнулось с невозможностью построить циркулем и линейкой отрезок, выражаемый кубическим корнем. Эти задачи решались геометрически при помощи кривых — гиперболы и параболы. Все возможные случаи решения кубического уравнения геометрическими методами рассмотрел среднеазиатский математик и знаменитый поэт Омар Хайям в XI в. Алгебраическое решение кубического уравнения, т. е. открытие формулы, которая позволяет выразить корни уравнения через его коэффициенты, было найдено в XVI в. итальянскими математиками Ферро, Тартальей и Кардано. Эта формула носит имя Кардано, хотя он не являлся основным действующим лицом в данном открытии и сам признавал это.

Существенно важным при решении кубического уравнения в общем случае является выражение корней в тригонометрической форме.

Алгебраическое решение уравнений четвертой степени в общем случае было найдено в том же веке учеником Кардано Феррари. Свой особый способ для этого дал Л. Эйлер в 1732 г.

Очень многие крупнейшие математики предпринимали попытки решить алгебраически уравнение пятой степени в общем случае, т. е. пытались найти формулу, при помощи которой можно было бы вычислить корни уравнения по его коэффициентам. Однако эти усилия оказались тщетными. Многие математики (Лейбниц, Эйлер, Гаусс) высказывали мысль, что для уравнений пятой и более высоких степеней в общем случае не существует алгебраической формулы для выражения корней через коэффициенты. Доказал это положение норвежский математик Нильс Абель (1802—1829).

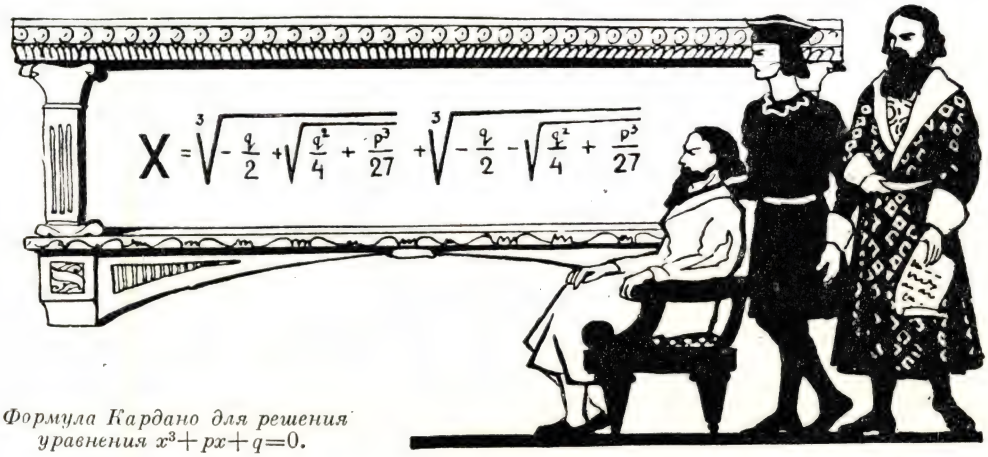
Французский математик Эварист Галуа (1811—1832) указал метод, при помощи которого по виду уравнения можно установить, решается оно алгебраически или нет.

Голландский математик Жирар (1629) высказал предположение, что уравнение n-й степени имеет n корней, если считать корнями отрицательные и мнимые выражения (сам Жирар не считал их корнями уравнения); смелее эту мысль выразил Декарт, со всей определенностью — Ньютон в конце XVII в.

Эйлер в 1742 г. заявил, что всякое алгебраическое выражение может быть разложено на множители с действительными коэффициентами первой или второй степени. Эта мысль в иных словах означает, что всякое алгебраическое уравнение имеет корень, который может быть числом действительным или мнимым, одним словом — комплексным.

Строго это доказал двадцатидвухлетний Гаусс.

Для вычисления приближенных значений корней уравнений высших степеней существует много приемов, которые часто применяются на практике и к уравнениям третьей и четвертой степеней, так как абсолютная точность корня на практике не всегда нужна,



Формула Кардано для решения уравнения $x^3+px+q=0$.

Так в разное время обозначали неизвестное в уравнениях.

а применение формул сложно. Самаркандский математик ал-Каши (XV в.) дал хорошую приближенную формулу для нахождения корней уравнений третьей степени, а Ньютон и другие—для уравнений любой степени. Очень важный метод для этого дал Н. И. Лобачевский.

КОГДА ПОЯВИЛИСЬ ТЕРМИНЫ, УПОТРЕБЛЯЕМЫЕ В УЧЕНИИ ОБ УРАВНЕНИЯХ

В заключение укажем время появления некоторых терминов, употребляемых в учении об уравнениях.

Герон около 100 г. до н. э. называл неизвестное τ (тау) — «нечто».

Арьябхата (Индия) в VI в. н. э. называл неизвестное гулика (шарик), в отличие от известных величин рупака (монета, снабженная указанием ценности). Позднее индийские математики стали называть неизвестные словами, обозначающими разные цвета.

Диофант обозначал неизвестное буквой σ а понятие «равняется»—буквой ι (от греческого слова «изосис» — «равенство»).

Римляне перевели это понятие на свой язык словом equatio — «равенство», и отсюда возникли во всех европейских языках термины для обозначения уравнения: die Gleichung, the equation. Наше обозначение неизвестного буквой x произошло, по-видимому, от итальянского названия неизвестного «cosa» — «вещь» (почему алгебра называлась коссическим искусством), позаимствованного от арабов, где слово «вещь» начинается с буквы, соответствующей букве x. Декарт окончательно установил употребление для обозначения неизвестных последних букв латинского алфавита, вначале чаще употребляя для этого букву z.

Писать уравнение так, что в одной части стоят все члены, а в другой 0, стали в XVII в. (Харриот, Декарт), ранее это имело место только в отдельных случаях (известен даже один пример такой записи у вавилонян).

Вместо выражений вида xx, xxx, ... фламандец Стевин (XVI в.) стал писать 1, 2, 3,... Декарт ввел знакомые нам сокращения: x^2, x^3,... Термин коэффициент ввел Виет, степень уравнения —Декарт. Термин корень уравнения употребляет систематически Штифель (немецкий священник и математик XVI в.), но в связи с извлечением корня при решении квадратного уравнения термин этот иногда употребляет еще Леонардо Пизанский (XIII в.).

Название возвратное уравнение ввел Эйлер (1733), термин дискриминант — ирландский математик Гамильтон (около 1840 г.).

ЧТО ТАКОЕ КООРДИНАТЫ И ДЛЯ ЧЕГО ОНИ СЛУЖАТ

Почему так нелегко бывает решать некоторые геометрические задачи?

Всем известно, с какими трудностями приходится встречаться при решении многих геометрических задач, например таких, как задачи на построение, на отыскание геометрических мест или на доказательство теорем.

В чем же состоят эти трудности? В чем их причина?

Трудность состоит в том, что у нас, как правило, нет никаких общих приемов, с помощью которых мы могли бы решать такие задачи.

Часто новая задача требует отыскания своего особого способа решения, обычно совсем не похожего на те, которыми мы пользовались при решении предыдущих задач. Доказывая новую теорему, никогда заранее не знаешь, какие вспомогательные построения надо выполнить. А отыскание этих построений связано зачастую с долгими поисками и всевозможными догадками. Даже задачи, похожие по своему содержанию друг на друга, решаются приемами, часто не имеющими между собой ничего общего. Достаточно вспомнить доказательства хотя бы таких похожих друг на друга теорем, как теоремы о трех замечательных точках треугольника:

1. Три биссектрисы внутренних углов треугольника пересекаются в одной точке.

2. Три медианы треугольника пересекаются в одной точке.

3. Три высоты треугольника пересекаются в одной точке.

Эти три теоремы похожи одна на другую, поскольку в каждой из них говорится о трех прямых, которые пересекаются в одной точке. (Конечно, эти прямые в каждой теореме разные — иначе не было бы трех разных теорем.) И в учебнике эти теоремы расположены близко друг к другу. Но как по-разному они доказываются! Первая теорема доказывается совсем просто: три биссектрисы пересекаются в центре вписанной окружности. Но доказательство второй теоремы, если его не знать заранее, найти самому далеко не просто. То же касается и третьей теоремы.

Отсутствие общих приемов для решения геометрических задач и доказательств геометрических теорем является большим недостатком элементарной геометрии. Этот недостаток особенно чувствителен потому, что в естествознании, физике, механике и в технике нам приходится встречаться с гораздо более сложными линиями и поверхностями, чем те, с которыми мы имеем дело в школьной геометрии. Например, в технике мы встречаемся с такими линиями, как эллипс, гипербола, парабола, цепная линия, винтовая линия, кардиоида и т. д.

В технике мы встречаемся с такими поверхностями, как эллипсоиды, параболоиды, гиперболоиды, псевдосферы и многие, многие другие. Легко себе представить, насколько труднее стало геометрам решать задачи с этими сложными кривыми поверхностями, когда до всего надо было доходить по догадке!

Естественно, что у геометров возникла мысль о поисках каких-то общих приемов для решения самых разнообразных геометрических задач. Геометры хотели иметь такие приемы, чтобы, имея задачу, они не гадали, как приступить к ее решению, а сразу бы знали, как ее решать.

Но существуют ли такие общие приемы? Не бесплодна ли мечта пытаться их найти? Оказывается, такие приемы существуют. Чтобы показать, где их искать и какими они могут быть, остановимся вкратце на решении арифметических и некоторых геометрических задач, где такие приемы существуют и хорошо известны читателям.

Мы знаем, с какими затруднениями приходится встречаться при решении даже не очень замысловатых арифметических задач и насколько проще становится решать эти же самые задачи в алгебре. Почему же так трудно решать эти арифметические задачи в арифметике и в чем состоит то облегчение, которое вносит в их решение алгебра?

Трудности решения арифметических задач такие же, как и геометрических. Прочтя условие задачи, никогда заранее не знаешь, каким путем ее решать, какие действия надо выполнить над заданными числами. Часто две даже похожие задачи решаются совсем по-разному, и над каждой новой задачей надо думать заново, чтобы найти свой особый способ ее решения.

Совсем иначе обстоит дело в алгебре. Прочитав условие задачи, мы всегда сразу знаем, что́ нам надо делать для ее решения. Обозначив неизвестные через x, y,..., мы ищем из условия задачи равные друг другу количества. Конечно, эти поиски тоже требуют некоторого навыка, однако мы знаем, что все школьники с ними успешно справляются. Найдя эти равные количества и приравнивая их, мы получаем уравнения, которые и решаем по известным правилам алгебры. Таким образом, в алгебре для всех задач существует один общий способ их решения — он состоит в составлении и решении уравнений. Это и обусловливает относительную легкость алгебраического решения задач. Пользуется ли геометрия уравнениями? Да! Но только далеко не во всех случаях. Там, где геометрия использует уравнения, они сразу упрощают решение задач. Каждый по своему опыту хорошо знает, насколько проще решаются задачи на вычисление (где мы пользуемся уравнениями), чем на построение или на доказательство.

Однако с помощью уравнений решаются

далеко не все геометрические задачи. В частности, задачи на геометрические места и на доказательство геометрических теорем далеко не всегда поддаются такому алгебраическому решению. Это, как мы говорили, и заставило геометров искать такие способы их решения, которые можно было бы по общему правилу применять если не ко всем, то к громадному числу всевозможных геометрических задач, даже таких, где наряду с простейшими геометрическими линиями и поверхностями участвуют и более сложные, о которых мы выше говорили. Эти способы основаны на использовании системы координат. Но, прежде чем рассказывать об этих способах, нам надо познакомиться с системой координат.

СИСТЕМА КООРДИНАТ

Здесь мы рассмотрим лишь планиметрические задачи и поэтому будем говорить о системе координат на плоскости.

Проведем на плоскости две взаимно-перпендикулярные прямые, для простоты — горизонтальную и вертикальную (рис. 1), и обозначим точку их пересечения буквой O. Ее мы будем называть **началом координат**. Примем некоторый отрезок OE за единичный. Это значит, что его длину мы будем считать единицей масштаба при измерении длин любых отрезков, которые мы будем откладывать на наших прямых. (Для простоты, хотя это и не обязательно, мы будем считать единицу масштаба одной и той же для обеих прямых.)

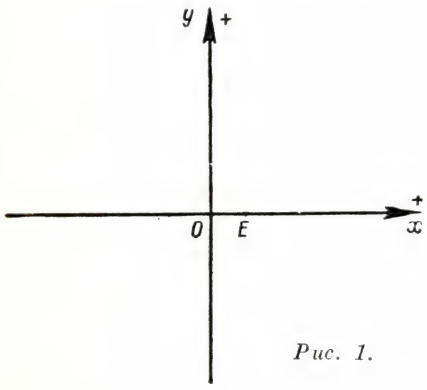


Рис. 1.

Так как на каждой из прямых от точки O можно откладывать отрезки в двух противоположных направлениях, то мы примем направление слева направо на горизонтальной прямой и снизу вверх на вертикальной за **положительные**.

Противоположные им направления будем считать **отрицательными**. Горизонтальную прямую, на которой мы установили положительное направление, назовем **осью абсцисс** или осью Ox. Вертикальную прямую назовем **осью ординат** или осью Oy. Обе прямые вместе называются **системой координат**.

Система координат, о которой мы сейчас говорили, называется **декартовой** по имени французского математика Рене Декарта (1596—1650), который впервые ввел ее в своей книге «Геометрия», изданной в 1637 г.

Система координат служит для того, чтобы с ее помощью задавать в плоскости положение точек, отрезков и различных геометрических фигур (поэтому она и называется системой координат, т. е. в дословном переводе «системой соотнесения»). Пусть в плоскости, где у нас начерчена система координат, отмечена какая-нибудь точка M (рис. 2). Чтобы охарактеризовать ее положение по отношению к системе координат, опустим из точки M перпендикуляры MM_1 на ось Ox и MM_2 на ось Oy. Длина отрезка OM_1, измеренная в принятом масштабе и взятая с определенным знаком, называется **абсциссой** точки M и обозначается в общем случае буквой x. Длина отрезка OM_2, измеренная в этом же масштабе и взятая с определенным знаком, называется **ординатой** точки M и обозначается в общем случае буквой y. Знаки абсциссы и ординаты устанавливаются следующим образом: если точка M_1 лежит справа от точки O, то абсцисса x считается, согласно нашему условию о положительном направлении на оси Ox, положительной, а если точка M_1 лежит слева от точки O, то абсцисса считается отрицательной. Точно так же если точка M_2 лежит выше точки O, то ордината y считается положительной, а если точка M_2 лежит ниже точки O, то ордината считается отрицательной. Абсцисса и ордината точки M, взятые вместе, называются **координатами** точки M.

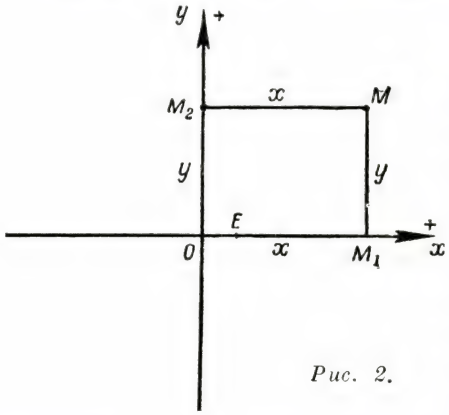


Рис. 2.

В нашем примере была дана точка M, и мы определяли ее координаты. Но может ставиться

и обратная задача: даны координаты точки N, и по ним требуется построить точку N.

Пусть, например, нам задана система координат и даны абсцисса $x=3$ и ордината $y=5$ некоторой точки N, что записывают в виде $N(x=3,\ y=5)$ или еще короче: $N(3\ 5)$. (Абсцисса всегда пишется на первом месте, а ордината—на втором.)

Построим точку N. Для этого (рис. 3) отложим отрезок ON_1, равный 3 единицам масштаба, по оси Ox вправо от точки O и отрезок ON_2, равный 5 единицам, по оси Oy вверх от точки O (так как 3 и 5—положительные числа). Из точки N_1 восставим перпендикуляр к оси Ox, а из точки N_2 восставим перпендикуляр к оси Oy. Точка пересечения перпендикуляров и будет точкой N.

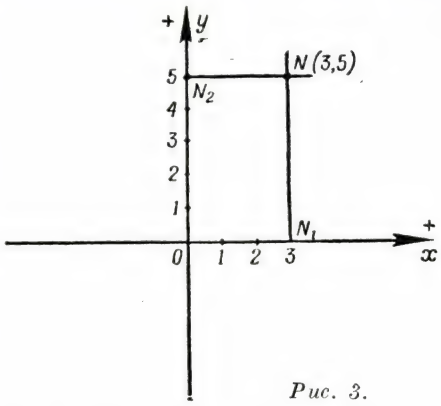


Рис. 3.

Пример. На рис. 4 построены точки $A(3,\ 2)$, $B(-5,\ 6)$, $C(-2,-3)$, $D(4,-2)$.

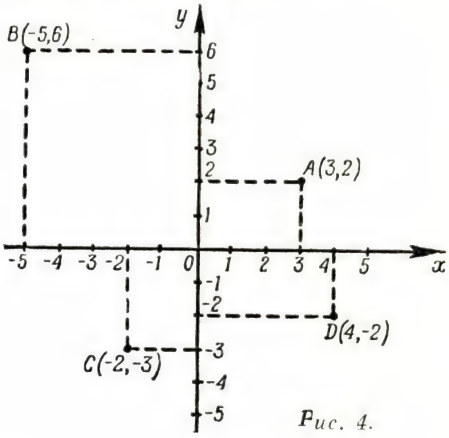


Рис. 4.

Таким образом, мы видим, что каждая точка M плоскости имеет вполне определенные координаты x, y; и обратно: задание абсциссы и ординаты (x и y) определяет на плоскости единственную точку M.

Если в плоскости задана система координат, то по отношению к ней мы можем задавать не только расположение точек, но и любых фигур. Например, если мы хотим задать расположение $\triangle MNP$, то для этого достаточно задать координаты каждой из его вершин (рис. 5).

Естественно предположить, что если фигуру (например, треугольник) можно полностью задать координатами тех точек, которые ее определяют, то, пользуясь этими же координатами, можно определить и все элементы фигуры, в частности длины сторон, углы, площади и т. д. Это предположение оправдывается.

Покажем, например, как определить длину отрезка AB, зная координаты его концов A и B.

Пусть нам даны две точки A и B своими координатами $A\ (4,\ 2)$ и $B\ (7,\ 6)$. (рис. 6). Требуется найти длину отрезка.

Поступим следующим образом: опустим из точки B перпендикуляр BB' на ось Ox. Из точки A опустим перпендикуляр на отрезок BB'. В пересечении этого перпендикуляра с отрезком BB' получим точку C. Мы получили прямоугольный треугольник ABC. По теореме Пифагора нам известно, что

$$AB^2=AC^2+CB^2.$$

В нашем случае имеем:

$$AC=7-4=3,$$
$$CB=6-2=4.$$

Тогда

$$AB=\sqrt{3^2+4^2}=5.$$

Мы могли бы и в общем, алгебраическом, виде записать нашу формулу для определения длины отрезка. Для этого предположим, что нам даны точки A и B своими координатами,

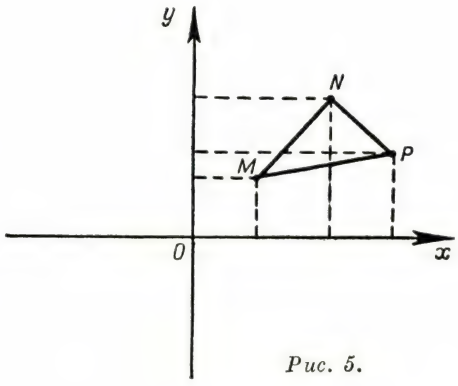


Рис. 5.

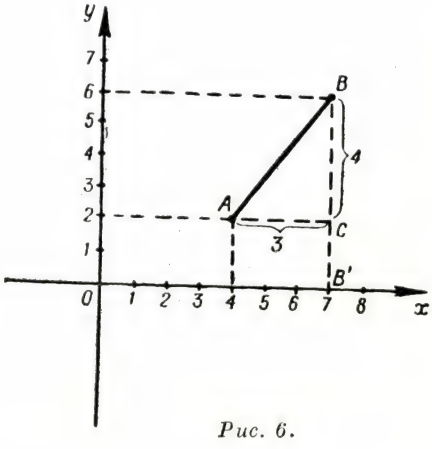


Рис. 6.

выраженными в буквенной форме. Пусть они будут $A(x_1, y_1)$ и $B(x_2, y_2)$. Снова, прежним способом, построим наш прямоугольный треугольник (рис. 7).

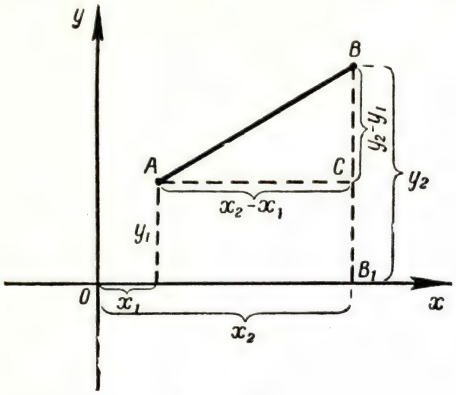


Рис. 7.

Тогда получим:

$$AC=x_2-x_1, \quad CB=y_2-y_1.$$

Следовательно, по теореме Пифагора

$$AB^2=(x_2-x_1)^2+(y_2-y_1)^2.$$

И окончательно получаем длину отрезка AB по формуле [1]

$$AB=\sqrt{(x_2-x_1)^2+(y_2-y_1)^2}. \qquad (1)$$

Понятно, что перед корнем мы всегда берем знак «плюс», так как длина отрезка есть число положительное.

Если сравнить нашу общую формулу (1) с формулой предыдущего примера, то мы увидим, что последняя есть частный случай общей формулы (1). Именно в предыдущем случае мы имели:

$$x_1=4, \quad y_1=2, \quad x_2=7, \quad y_2=6.$$

Таким образом, мы имеем способ для вычисления длин любых отрезков, входящих в состав любого многоугольника, например длин сторон треугольников, четырехугольников и т. д. Из решения нашего примера видно, что с помощью системы координат мы можем решать многие задачи, даже не вычерчивая самой фигуры на чертеже. Действительно, совершенно ясно, что, имея общую буквенную формулу (1) для определения длины отрезка AB, мы могли бы определить его длину между точками A (4, 2) и B (7, 6), даже не вычерчивая его, а только подставляя координаты точек A и B в формулу (1), как мы это и показали после вывода общей формулы (1).

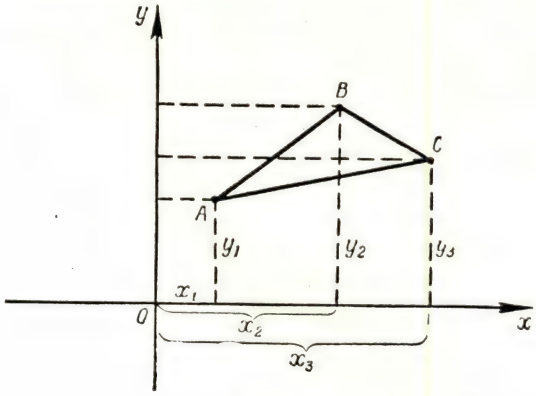


Рис. 8.

Это особенно хорошо видно на следующем примере. Запишем без вывода формулу, по которой можно определить площадь треугольника, если заданы координаты его вершин.

Если даны вершины треугольника $A(x_1, y_1)$, $B(x_2, y_2)$ и $C(x_3, y_3)$ (рис. 8) их координатами, то формула для площади треугольника ABC будет иметь вид:

$$S=\frac{1}{2}\left|\{(x_2-x_1)(y_3-y_1)-(x_3-x_1)(y_2-y_1)\}\right|.$$

(Вертикальные черточки показывают, что стоящую между ними величину мы берем по ее абсолютному значению.)

Рассмотрим числовой пример на применение этой формулы.

Пример. Пусть дан треугольник своими вершинами A (3, 4), B (5, 7), C (9, 6). Найти его площадь.

Принимаем, что

$$x_1=3, \; x_2=5, \; x_3=9;$$
$$y_1=4, \; y_2=7, \; y_3=6.$$

Подставляем эти значения в нашу формулу. Находим:

$$S=\frac{1}{2}\left|\{(5-3)(6-4)-(9-3)(7-4)\}\right|=$$
$$=\frac{1}{2}\left|-14\right|=7.$$

Мы нашли площадь треугольника без всякого чертежа. Если теперь выполнить чертеж (рис. 9) и подсчитать площадь нашего треугольника по клеточкам, то нетрудно убедиться, что наша задача решена правильно.

[1] Легко доказать справедливость этой формулы при любом расположении точек относительно системы координат.

Таким образом, и на этом примере мы видим, что использование системы координат снова позволило нам решить задачу, даже не вычерчивая той фигуры (треугольника), о которой в ней шла речь.

Это — очень важное свойство системы координат, так как во многих случаях оно освобождает нас от необходимости выполнения иногда весьма громоздких чертежей.

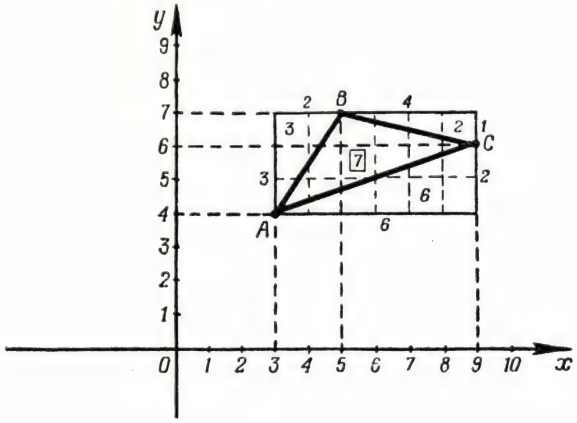


Рис. 9.

В повседневной жизни мы часто пользуемся системой координат, обычно даже не задумываясь над этим.

Вот простые примеры. Покупая билет в кино, мы читаем на нем номера ряда и места в ряду. Например, ряд 5, место 4. По существу, как показывает рис. 10, эти числа — не что иное, как координаты нашего места.

Вот пример для шахматиста. Играя турнирную партию, шахматный мастер обычно ее записывает. А любители шахмат, пользуясь этой записью (шахматной нотацией), могут ее разыграть и проанализировать. На чем основана запись шахматной партии? На системе координат, которую шахматист мысленно вводит на шахматной доске. Записывая ход Kg1—f3, он сообщает, что его конь, стоявший на поле с координатами (g, 1), перешел на поле с координатами (f, 3) (рис. 11). Только здесь поля вдоль оси *Ox* обозначаются не числами, а буквами.

Рассмотрим важнейшие применения системы координат. Использование координатной системы носит в основном двоякий характер. Во-первых, с ее помощью строят графики различных зависимостей, с которыми мы встречаемся в естествознании, физике, механике, технике и в самой математике, а также в других науках. Во-вторых, как мы уже об этом говорили в самом начале, система координат позволяет находить некоторые общие приемы для решения самых разнообразных геометрических задач. Сейчас мы объясним все это на примерах.

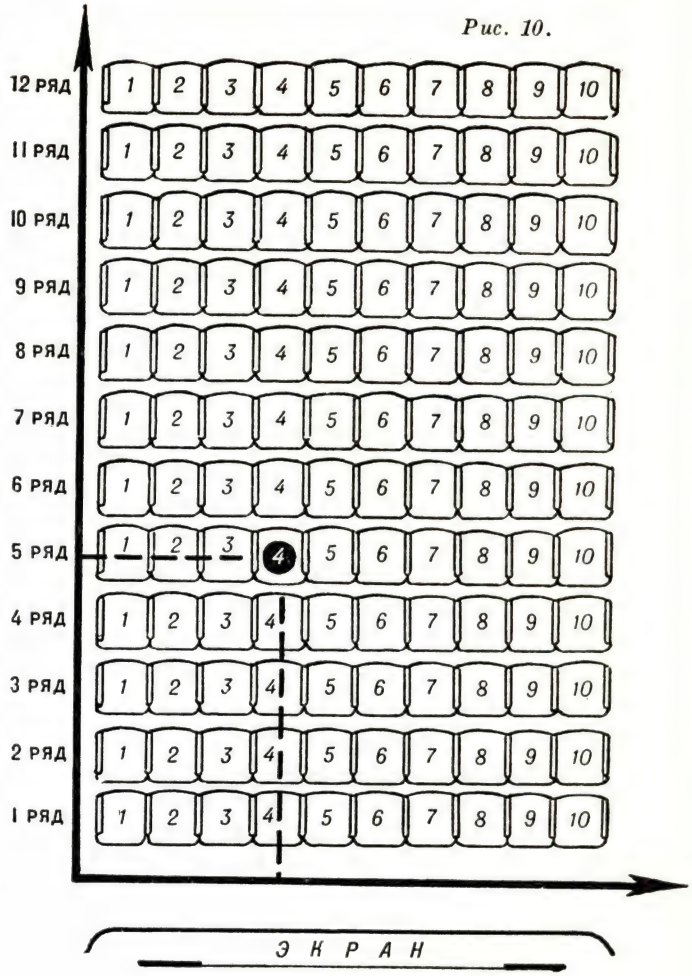


Рис. 10.

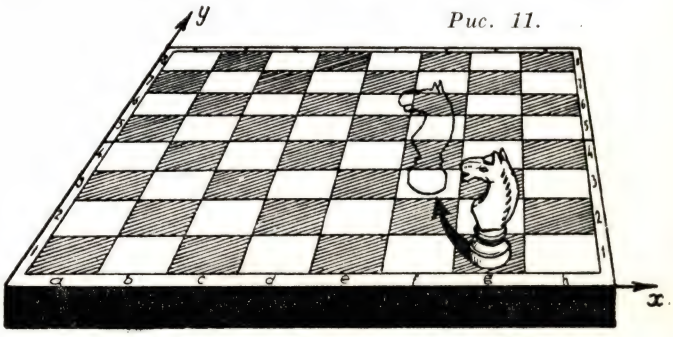


Рис. 11.

ПОСТРОЕНИЕ ГРАФИКОВ

Каждому из читателей, вероятно, не раз приходилось иметь дело с графиками как в физике, так и в математике.

Вероятно, всем встречалось уравнение равномерного движения

$$s = vt,$$

где s обозначает путь, пройденный телом за время t, а v — это постоянная скорость равномерного движения этого тела. График этого уравнения представляет собой прямую линию. Он изображен на рис. 12.

Укажем еще один пример графика, на этот раз из алгебры, и напомним его построение. Пусть нам дано уравнение

$$y = x^2.$$

Давая различные значения абсциссе x и вычисляя соответствующие значения ординаты y, получим таблицу

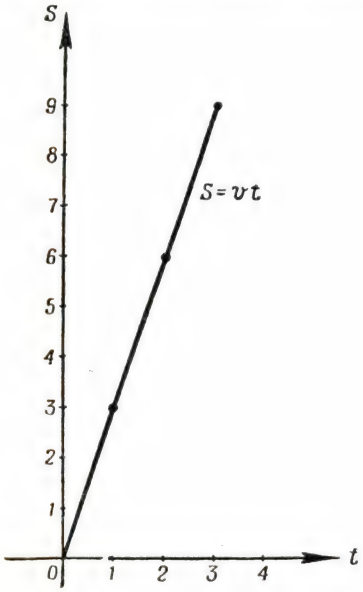


Рис. 12.

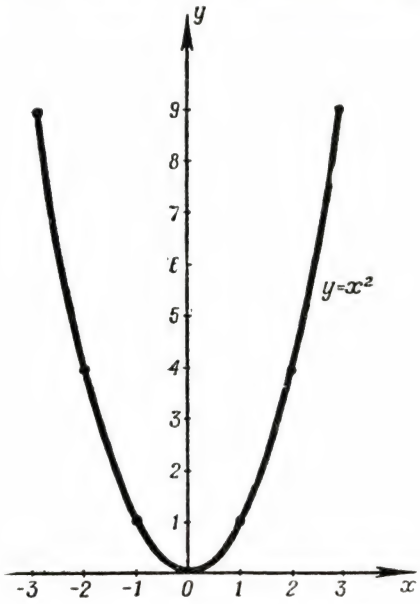


Рис. 13.

x	...	−4	−3	−2	−1	0	1	2	3	4	...
y	...	16	9	4	1	0	1	4	9	16	...

По этой таблице мы можем построить лишь отдельные точки нашего графика. Если мы будем давать абсциссе x не только целые значения, но и промежуточные, дробные, и вычислять по ним соответствующие значения ординаты y, то построенные после этого точки нашего графика будут располагаться теснее друг к другу. Соединяя построенные таким образом точки плавной линией, мы с достаточной степенью точности построим график нашего уравнения (рис. 13).

Читатель, вероятно, согласится с тем, что зависимость, изображенная графически, более наглядна, чем зависимость, заданная формулой. Видя график, мы сразу, с одного взгляда, схватываем взаимоотношения между всеми значениями переменных и видим, как изменения одного из них влияют на изменения другого. Между тем без графика мы затратили бы гораздо больше труда на то, чтобы обнаружить эти взаимоотношения из формулы.

Рассмотренные примеры показывают нам, что уравнение между двумя переменными величинами определяет некоторую линию (отдельные исключения, когда уравнение не определяет линии, встречаются редко, и мы их здесь не рассматриваем).

УРАВНЕНИЯ ЛИНИЙ

Все сказанное приводит нас к очень глубоким выводам, в которых с особенной полнотой раскрывается значение системы координат. Мы видели, что, зная уравнение, связывающее две переменные величины x и y, мы можем по нему построить график, т. е. линию. Поэтому можно сказать, что уравнение в своей буквенной алгебраической записи как бы в сжатом виде содержит все те свойства линии, которые мы обнаруживаем у нее на чертеже. Это приводит к тому, что очень часто свойства линии изучаются не по ее изображению на чертеже, а по ее уравнению. Но отсюда, вполне естественно, возникает следующая интересная мысль. Если уравнение, в которое входят x и y, заключает в себе свойства своего графика, то нельзя ли решить и обратную задачу: зная свойства

линии, составить для нее уравнение (графиком которого она являлась бы)?

Оказывается, эту задачу решить можно.

Мы начнем с одного, очень простого, можно сказать очевидного, примера, для того чтобы на нем показать, как составляются уравнения линий, а потом перейдем к более интересным и сложным случаям и посмотрим, какие выводы из этого следуют.

Пример 1. Составить уравнение линии, лежащей в I и III координатных углах, каждая точка которой расположена вдвое ближе к оси Oy, чем к оси Ox.

Чтобы составить уравнение нашей линии, возьмем систему координат (рис. 14) и отметим в ней какую-нибудь точку M этой линии. Мы можем считать, что наша линия описана движением этой точки M.

Запишем теперь алгебраически то свойство, которое определяет искомую линию, т. е. свойство, которым обладает каждая ее точка (и только ее точки), а значит, и точка M во все время своего движения. Опуская из точки M перпендикуляры на оси Ox и Oy и обозначая их основания через M_1 и M_2, можем сказать, что по условию задачи M_2M будет вдвое меньше, чем M_1M, т. е. можем записать:

$$M_1M = 2M_2M.$$

Но мы видим, что M_1M есть ордината y точки M, а M_2M есть абсцисса x точки M.

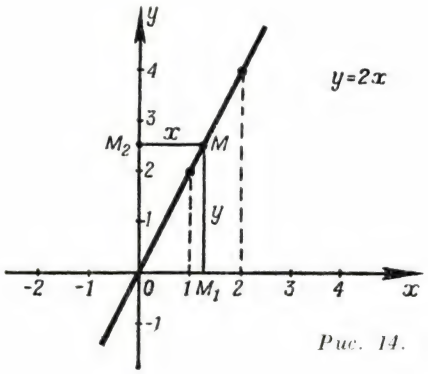


Рис. 14.

Подставляя в наше уравнение вместо M_2M и M_1M координаты x и y, получим уравнение

$$y = 2x.$$

Мы можем утверждать, что это и есть искомое уравнение нашей линии, так как ее можно построить как график этого уравнения. Эта линия является прямой. Действительно, давая абсциссе x всевозможные значения и вычисляя по ним соответствующие значения ординаты y, получим таблицу

x	...	−3	−2	−1	0	1	2	3	...
y	...	−6	−4	−2	0	2	4	6	...

Так как мы можем считать, что эта линия описана движением точки M, то мы называем точку M текущей точкой, а ее координаты x и y — текущими координатами.

Здесь мы вывели уравнение прямой линии, проходящей через начало координат. Выведем теперь уравнение прямой, произвольно расположенной в плоскости. Для этого прежде всего надо как-то задать расположение прямой относительно системы координат. Зададим нашу прямую точкой B, в которой она пересекает ось Oy, и углом α, который она образует с положительным направлением оси Ox (рис. 15). Нашу задачу можно теперь сформулировать следующим образом.

Пример 2. Составить уравнение прямой, пересекающей ось Oy в точке $B(0, b)$ и наклоненной к оси Ox под углом α.

Чтобы составить уравнение прямой, рассмотрим на ней текущую точку M с координатами x и y. Запишем алгебраически условие, которому должна подчиняться текущая точка M, описывающая нашу прямую. Нетрудно заметить, что это условие имеет вид

$$\frac{AM}{BA} = \operatorname{tg} \alpha.$$

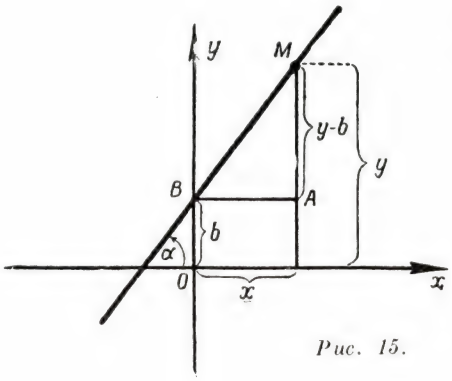


Рис. 15.

Действительно, где бы ни располагалась точка M на прямой, это условие всегда выполняется. И обратно, это условие перестанет выполняться, как только точка M сойдет с нашей прямой.

Запишем теперь величины, входящие в наше уравнение, через заданные величины, определяющие прямую (b и α), и через координаты текущей точки x и y.

Имеем: $AM = y - b$, $BA = x$. Уравнение принимает вид

$$\frac{y-b}{x} = \operatorname{tg} \alpha.$$

Разрешая его относительно y, получаем:

$$y = \operatorname{tg}\alpha \cdot x + b.$$

Обычно $\operatorname{tg}\alpha$ заменяют буквой k, после чего уравнение прямой принимает вид

$$y = kx + b.$$

Величина k называется угловым коэффициентом прямой. Из вывода нашего уравнения ясно, что величины k и b могут иметь любые числовые значения. Например, если точка B лежит ниже оси Ox, то b будет отрицательным. Если прямая будет наклонена к оси Ox под тупым углом, то k будет отрицательным. Они также могут равняться 0.

Надо заметить, что уравнение прямой, параллельной оси Oy, не может быть написано в виде $y = kx + b$, так как в этом случае $k = \operatorname{tg}90°$, т. е. не существует.

На рис. 16 построена прямая по уравнению

$$y = -2x + 3.$$

Пример 3. Вывести уравнение окружности с центром в точке C (a, b) и радиусом, равным r (рис. 17).

Для вывода уравнения окружности надо алгебраически записать то свойство, которым она определяется. Как мы знаем, окружность есть геометрическое место точек, удаленных от заданной точки (центра) на данное постоянное расстояние, называемое радиусом.

Пусть текущей точкой окружности будет точка $M(x, y)$. Запишем, что ее расстояние от точки C (центра) будет равно радиусу: $CM = r$. Считая точку C за первую точку, а точку M за вторую, мы можем вычислить расстояние CM по формуле (1), полагая, что $x_1 = a$, $y_1 = b$, $x_2 = x$, $y_2 = y$. Тогда найдем:

$$CM = \sqrt{(x-a)^2 + (y-b)^2},$$

откуда

$$\sqrt{(x-a)^2 + (y-b)^2} = r.$$

Освобождаясь от знака радикала путем возведения обеих частей уравнения в квадрат, находим уравнение окружности в окончательном виде:

$$(x-a)^2 + (y-b)^2 = r^2.$$

Если центром будет начало координат, то надо считать, что $a = 0$ и $b = 0$ (рис. 18). Тогда уравнение примет вид

$$x^2 + y^2 = r^2.$$

На рис. 19 построена окружность по уравнению

$$(x-3)^2 + (y-5)^2 = 4.$$

После приведенных двух примеров читатель может спросить: «Зачем выводить уравнения прямой и окружности, если и без уравнений их можно легко построить: прямую по линейке, а окружность — циркулем?»

Ответ на этот вопрос читатель получит немного позже. Пока же заметим, что главная цель, которую мы преследуем, выводя эти уравнения, состоит не в построении по ним прямой или окружности, а в том, что эти уравнения позволят нам решать многие трудные геометрические задачи, связанные с этими линиями.

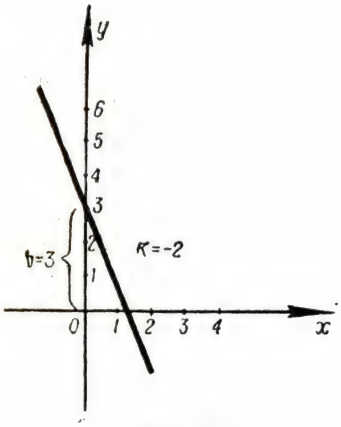


Рис. 16.

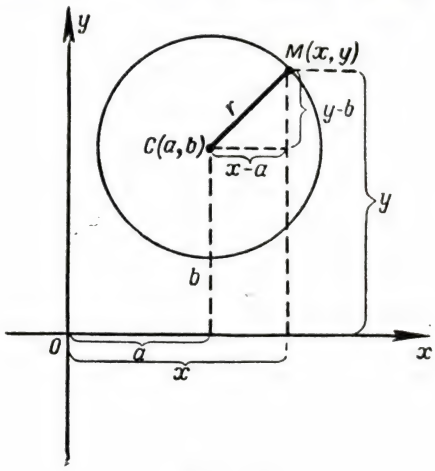


Рис. 17.

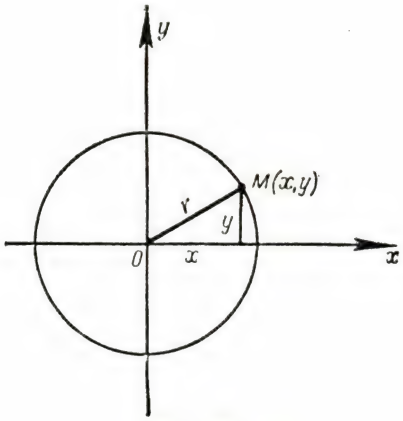


Рис. 18.

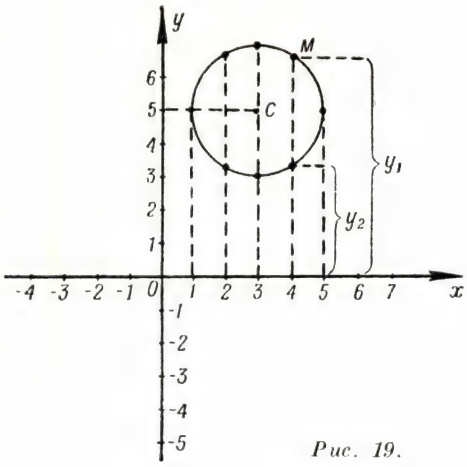


Рис. 19.

РЕШЕНИЕ ТРУДНЫХ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ЗАДАЧ С ПОМОЩЬЮ СИСТЕМЫ КООРДИНАТ

Вывод уравнений прямой и окружности приводит нас к следующему важному заключению: *для того чтобы составить уравнение линии, надо линию рассматривать как совокупность всех точек, обладающих некоторым определенным свойством.*

Алгебраическая запись этого свойства через координаты x и y текущей ее точки M и дает нам уравнение этой линии.

Таким образом, мы получили очень важный вывод. Пользование системой координат позволяет нам:

1. Зная уравнение линии, построить линию как график этого уравнения.

И обратно:

2. Зная свойство, определяющее линию как совокупность точек, мы можем составить уравнение этой линии.

Второе из этих утверждений и дает нам те общие приемы решения всевозможных трудных геометрических задач, о которых мы говорили в самом начале нашей статьи.

Желая решить какую-нибудь трудную геометрическую задачу или доказать теорему, мы поступим теперь следующим образом. Запишем условие нашей задачи или теоремы в алгебраическом виде (как мы это только что делали). Эта запись и даст нам уравнение линии, о которой идет речь в задаче. Иногда, в зависимости от условий задачи, в ней может возникнуть и несколько уравнений. Каждое такое уравнение будет содержать в себе все свойства определяемой им линии. Поэтому мы сведем решение нашей геометрической задачи к действиям с уравнениями. А это, как мы знаем из сказанного в начале нашей статьи, значительно упрощает ее решение.

Вот два примера, подтверждающие нашу мысль.

З а д а ч а. Даны две точки, имеющие координаты $A(1, 0)$ и $B(9, 0)$ (рис. 20). Найти, по какой линии движется точка, которая все время остается втрое ближе к точке A, чем к точке B.

Если попытаться решить эту задачу как чисто геометрическую (не пользуясь уравнениями), то нам придется серьезно над ней задуматься, так как сразу трудно сказать, по какой линии будет двигаться наша точка. Между тем если воспользоваться теми соображениями, о которых мы только что говорили, то решение этой задачи мы найдем сразу и почти без труда.

Мы знаем, что искомая линия характеризуется тем, что каждая ее точка M находится втрое ближе к точке A, чем к точке B, т. е. MB втрое больше, чем MA. Запишем это свойство алгебраически:

$$3MA = MB. \qquad (1)$$

Обозначим координаты нашей подвижной точки M через x и y. Тогда, пользуясь формулой (1), мы сможем выразить расстояния MA и MB через координаты A, B и M.
Найдем:

$$MA = \sqrt{(x-1)^2+y^2}, \qquad MB = \sqrt{(9-x)^2+y^2}.$$

Вставляя теперь эти выражения в формулу (1) получим:

$$3\sqrt{(x-1)^2+y^2} = \sqrt{(9-x)^2+y^2}.$$

Чтобы избавиться от знаков радикала, возведем обе части нашего уравнения в квадрат.

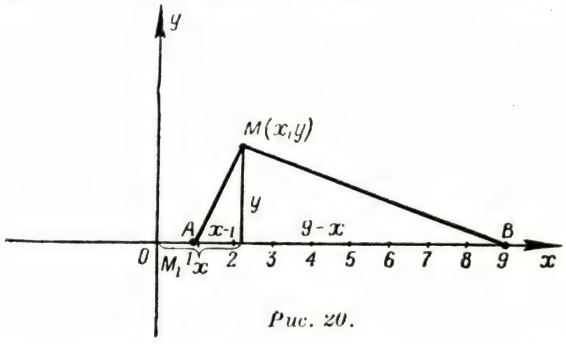


Рис. 20.

Одновременно раскроем скобки под радикалами. Тогда получим:

$$9(x^2 - 2x + 1 + y^2) = 81 - 18x + x^2 + y^2.$$

Перенеся теперь члены с x^2 и y^2 в левую часть равенства, а свободный член — в правую и

сокращая обе части уравнения на 8, найдем уравнение

$$x^2+y^2=9.$$

Мы получили уравнение, графиком которого будет окружность с центром в начале координат. Радиус ее равен 3 (рис. 21). Это значит, что каждая точка M этой окружности удовлетворяет условиям нашей задачи. Иначе говоря, точка M, которая при своем движении будет все время

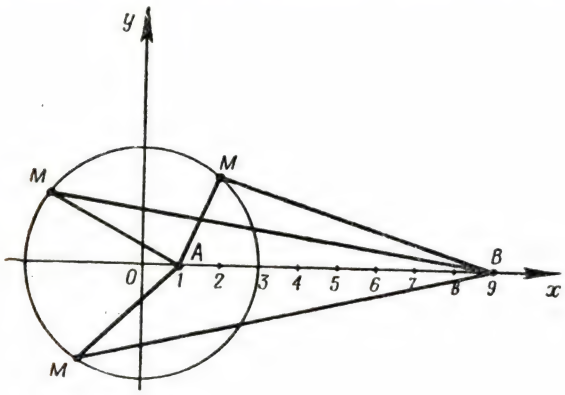


Рис. 21.

оставаться втрое ближе к точке A, чем к точке B, будет двигаться по этой окружности.

Мы видим, как легко и, можно сказать, «автоматически» мы получили решение этой задачи. Подобными же приемами решается и множество других задач.

Читателю, который захотел бы попробовать решить эту задачу без системы координат, мы дадим следующее краткое пояснение. Как мы видим, расстояние между нашими точками A и B равно 8 единицам (рис. 22). Пусть существует точка M, удовлетворяющая условиям нашей задачи, т. е. для которой $\frac{MA}{MB}=\frac{1}{3}$.

Разделим отрезок AB в отношении $1:3$. Делить его будет точка C, отстоящая от точки A на 2 единицы, так как отношение $AC:CB=2:6=1:3$. Соединим точку M с точками A, B, C. Тогда мы можем утверждать, что прямая MC будет биссектрисой $\angle AMB$ треугольника AMB. Действительно, существует теорема, что биссектриса угла ($\angle AMB$) треугольника делит противоположную его сторону на части, пропорциональные прилежащим сторонам. Существует и обратная ей теорема: *Если вершину угла треугольника соединить с точкой противолежащей стороны, делящей ее в отношении сторон, то эта прямая будет биссектрисой этого угла.* В нашем случае имеем:

$$\frac{AM}{MB}=\frac{1}{3},\quad \frac{AC}{CB}=\frac{1}{3}.$$

Отсюда

$$\frac{AM}{MB}=\frac{AC}{CB},$$

т. е. биссектриса $\angle AMB$ пройдет через точку C. Далее, существует теорема, что биссектриса внешнего угла ($\angle AMN$) треугольника ($\triangle AMB$) делит противоположную сторону (как говорят, «внешним образом») тоже на части, пропорцио-

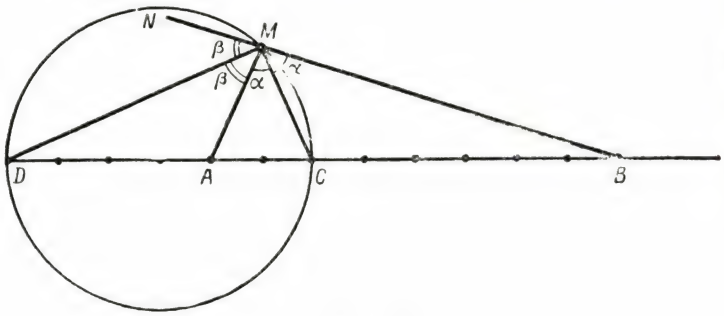


Рис. 22.

нальные прилежащим сторонам. Если в нашем случае прямая MD будет биссектрисой внешнего угла, то точка D будет отстоять от точки A влево на 4 единицы. Действительно, тогда имеем:

$$\frac{AD}{DB}=\frac{4}{12}=\frac{1}{3},\quad \frac{AM}{MB}=\frac{1}{3},\text{ т. е. }\frac{AD}{DB}=\frac{AM}{MB}.$$

Легко убедиться, что угол между двумя биссектрисами MC и MD — прямой: $2\alpha+2\beta=180^\circ$, и, следовательно, $\alpha+\beta=90^\circ$.

Отсюда вывод: точка M лежит на окружности, диаметром которой служит отрезок CD, равный 6 единицам. Можно доказать и обратное предложение, т. е. что всякая точка этой окружности будет удовлетворять условиям нашей задачи.

Это построение может быть и не так сложно, если только заранее его знать. Придумать его впервые значительно труднее.

Интересно отметить, что существует и общая теорема:

Геометрическим местом точек M, расстояния каждой из которых до двух данных точек A и B (т. е. AM и BM) находятся в постоянном отношении $m:n$ ($m\neq n$), является окружность (так называемая окружность Аполлония) (рис. 22).

Диаметром этой окружности служит отрезок, концы которого делят отрезок AB в отношении $m : n$ внутренним и внешним образом.

Если $m=n$, то, как легко видеть, геометрическим местом будет прямая, перпендикулярная к отрезку AB и проходящая через его середину (рис. 23).

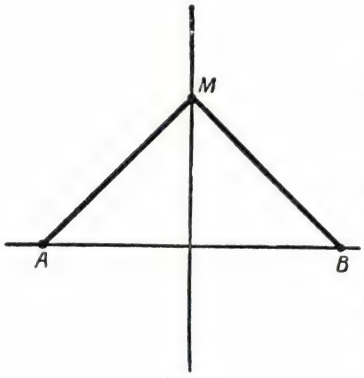


Рис. 23.

Рассмотрим еще одну задачу, решение которой чисто геометрическими приемами (т. е. с помощью построения) представляет значительные трудности, в то время как ее решение с использованием системы координат осуществляется без всякого труда.

З а д а ч а. Внутри прямого угла дана точка M. Провести через нее прямую так, чтобы отсекаемый ею прямоугольный треугольник OAB имел заданную площадь S (рис. 24).

Мы не будем искать решения этой задачи чисто геометрическим путем (рекомендуем желающим поискать его самостоятельно), а сразу введем систему координат и покажем координатный способ ее решения.

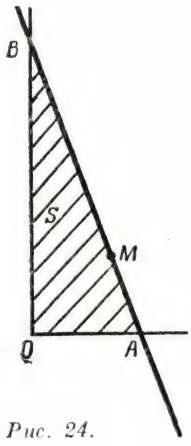


Рис. 24.

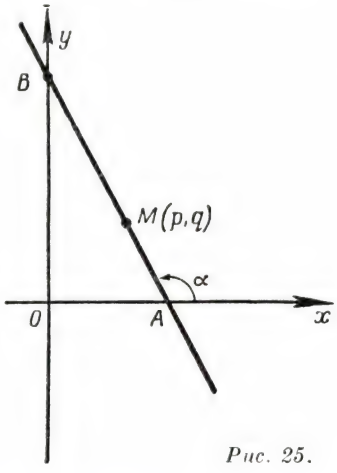


Рис. 25.

Расположим систему координат так, чтобы ее начало совпало с вершиной прямого угла, а положительные направления осей Ox и Oy совпали со сторонами угла OA и OB (рис. 25).

Положение точки M зададим ее координатами p и q, которые будем считать известными.

Наша задача теперь состоит в том, чтобы провести через точку $M(p, q)$ прямую под таким углом α наклона к оси Ox, чтобы площадь треугольника OAB была равна S, т. е. чтобы

$$\frac{OA \cdot OB}{2} = S, \text{ или } OA \cdot OB = 2S. \qquad (1)$$

Так как мы будем решать нашу задачу вычислительным путем, то будем считать своей целью найти уравнение искомой прямой, по которому мы сможем ее потом построить.

Уравнение прямой, как мы знаем, записывается в виде (см. стр. 132)

$$y = kx + b. \qquad (2)$$

В это уравнение входят две постоянные величины k и b, которые мы и должны найти из условий задачи. Величину b мы найдем, исходя из того, что наша прямая проходит через точку $M(p, q)$, а величину k — из условия (1), определяющего площадь треугольника AOB.

Так как наша прямая проходит через точку $M(p, q)$, то координаты p и q этой точки должны удовлетворять уравнению прямой, т. е. если мы подставим в уравнение (2) вместо x величину p, а вместо y величину q, то должны получить равенство

$$q = kp + b.$$

Из этого равенства мы можем выразить b через k. Имеем:

$$b = q - kp.$$

Подставляя это значение в уравнение (2), находим:

$$y = kx + q - kp. \qquad (3)$$

Теперь нам осталось найти k. Будем его искать, исходя из условия, что отрезки OA и OB, которые искомая прямая отсекает на осях координат, должны удовлетворять условию (1). Найдем сами эти отрезки. Отрезок $OB=b$ нами уже найден:

$$OB = b = q - kp.$$

Подставив в уравнение (3) значение ординаты точки A, т. е. значение $y=0$, мы найдем из этого уравнения значение абсциссы $x=OA$ точки A. Имеем:

$$0 = k \cdot x + q - kp,$$

откуда

$$OA = x = \frac{kp - q}{k}.$$

Таким образом, оба отрезка выражены через одно неизвестное k. Подставляя в условие (1)

найденные нами величины отрезков OA и OB, находим k:

$$\frac{kp-q}{k}(q-kp)=2S.$$

Освобождаясь от знаменателя и вынося во втором множителе за скобки — 1, имеем:

$$-(kp-q)^2=2kS.$$

Раскрываем скобки, меняем все знаки на обратные и получаем:

$$p^2k^2-2(pq-S)k+q^2=0.$$

Это — квадратное уравнение с одним неизвестным k. Все другие величины (p, q, S), входящие в уравнение, нам заданы.

Решаем уравнение относительно k. Имеем:

$$k=\frac{pq-S\pm\sqrt{(pq-S)^2-p^2q^2}}{p^2}.$$

Упрощая подкоренное выражение, находим для k окончательное выражение в виде

$$k=\frac{pq-S\pm\sqrt{S(S-2pq)}}{p^2}. \qquad (4)$$

Наша задача решена. Действительно, если точка M и площадь S нам даны, то p, q, S нам известны. Из полученной формулы находим k. Подставляя его в выражение

$$b=q-kp,$$

находим b. Вставляя найденные значения k и b в уравнение (2), находим уравнение искомой прямой. После этого нетрудно по уравнению построить и самую прямую.

Рассмотрим числовой пример.

З а д а ч а. Дана точка M (1, 8). Провести через нее прямую, образующую с осями координат треугольник OAB с площадью $S=18$ кв. ед.

Решаем эту задачу по полученным формулам, приняв во внимание, что у нас $p=1$, $q=8$, $S=18$. Имеем:

$$k=\frac{1\cdot8-18\pm\sqrt{18(18-2\cdot1\cdot8)}}{1}=-10\pm6,$$

или

$$k_1=-4,\quad k_2=-16.$$

Для каждого из наших k находим свое b:

$$b_1=8-(-4)\cdot1=12,$$
$$b_2=8-(-16)\cdot1=24.$$

Итак, получаем две прямые, удовлетворяющие условиям задачи (рис. 26):

$$y=-4x+12,$$
$$y=-16x+24.$$

Нетрудно подсчитать, что первая прямая отсекает на осях координат отрезки $OA_1=3$ и $OB_1=12$, а вторая $OA_2=\frac{3}{2}$, $OB_2=24$.

В обоих случаях площади треугольников OA_1B_1 и OA_2B_2 одинаковы:

$$S_1=\frac{OA_1\cdot OB_1}{2}=18,\ S_2=\frac{OA_2\cdot OB_2}{2}=18.$$

Однако этим задача не заканчивается: представляет большой интерес исследовать полученные решения. Как мы видим из формулы (4), задача может иметь два решения, если

$$S-2pq>0$$

(S — величина положительная, и поэтому первый множитель под знаком радикала мы отбросили. Величины p и q тоже положительные). Этот случай мы имели в нашем числовом примере.

Задача не будет иметь ни одного решения (т. е. искомых прямых совсем не будет), если

$$S-2pq<0,$$

и задача будет иметь только одно решение (искомая прямая будет только одна), если

$$S-2pq=0.$$

Интересно выяснить, в чем заключается геометрический смысл этих условий? В каких случаях мы будем иметь два, одно или ни одного решения?

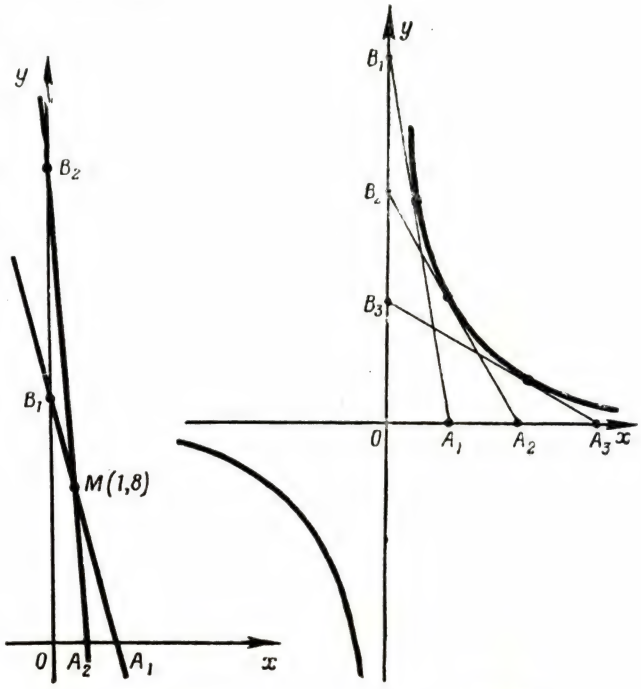


Рис. 26. Рис. 27.

Не проводя полных доказательств, мы остановимся здесь только на выяснении существа дела.

Читателю хорошо знаком график обратно пропорциональной зависимости (рис. 27), задаваемой уравнением:

$$y=\frac{a}{x} \text{ (при } a>0).$$

График, построенный по этому уравнению, есть кривая — гипербола.

Эта гипербола обладает замечательным свойством. Если проводить касательные к гиперболе в любой ее точке, то оказывается, что площади всех треугольников, образованных касательными с осями координат, будут одинаковыми и равными $2a$, т. е.

$$S=\text{пл. } \triangle OA_1B_1=\text{пл. } \triangle OA_2B_2=$$
$$=\text{пл. } \triangle OA_3B_3=\ldots=2a \quad (5)$$

(a — это та самая величина, которая стоит в числителе правой части уравнения гиперболы).

Можно утверждать и обратное. Если мы будем строить прямые, образующие с осями координат треугольники: $\triangle OA_1B_1$, $\triangle OA_2B_2$, $\triangle OA_3B_3$ и т. д. одинаковой площади S, то все эти прямые будут касаться некоторой гиперболы

$$y=\frac{a}{x}.$$

При этом величина a для этой гиперболы будет равна половине площади треугольника, как это следует из вышезаписанного равенства (5). Действительно, если

$$S=2a, \text{ то } a=\frac{S}{2}$$

и уравнение нашей гиперболы примет вид

$$y=\frac{S}{2x}.$$

Отсюда выясняется и смысл подкоренного выражения в формуле (4), определяющей значение k.

В нашей задаче было два условия. Искомая прямая проходит через точку $M(p, q)$ и образует с осями координат треугольник OAB площади S.

Если мы временно отбросим первое условие, то можем сказать, что все прямые, образующие с осями координат треугольники OAB заданной площади S, будут касаться некоторой гиперболы, построенной по уравнению

$$y=\frac{S}{2x}.$$

Теперь добавим первое условие. Тогда нам сразу станет ясно, что если точка $M(p, q)$, через которую должна проходить наша прямая, лежит между осями и гиперболой (точка M_1), то через нее пройдут две искомые прямые, касательные к гиперболе (рис. 28). Если же точка M (точка M_2) окажется на самой этой гиперболе, то через нее пройдет только одна искомая прямая, касательная к гиперболе в этой точке M_2.

И, наконец, если точка M (точка M_3) окажется внутри гиперболы, то через нее не пройдет ни одна искомая прямая, так как из точки M_3 нельзя провести касательных к гиперболе. Теперь нетрудно объяснить смысл знака подкоренного выражения $S-2pq$,

Рис. 28.

от которого зависит число решений нашей задачи.

Если точка M лежит на самой гиперболе, то, задав ее абсциссу $x=p$, мы получаем из уравнения гиперболы ее ординату y по формуле

$$y=\frac{S}{2p}.$$

Если наша точка $M_2(p, q)$ лежит на гиперболе, то ее ордината q равна y, полученному из уравнения гиперболы.

Имеем:

$$y=\frac{S}{2p}=q.$$

$$S=2pq, \text{ или } S-2pq=0.$$

В этом случае мы получаем одно решение нашей задачи — одну искомую прямую (рис. 28).

Если точка $M_1(p, q)$ лежит между осями и гиперболой, то ее ордината q меньше y, полученного из уравнения гиперболы, т. е.

$$q<y=\frac{S}{2p},$$

$$\frac{S}{2p}>q \text{ или } S-2pq>0,$$

и мы имеем два решения нашей задачи.

Наконец, если наша точка $M_3(p,\ q)$ лежит внутри гиперболы, то q больше y, полученного из уравнения гиперболы, т. е.

$$q > y,$$

$$q > \frac{S}{2p}, \text{ или } S - 2pq < 0,$$

и наша задача не имеет решений.

Но это и есть те самые условия, которые мы получили, исследуя подкоренное выражение в формуле (4).

УЛИТКА ПАСКАЛЯ

Рассмотрим теперь кривую, называемую улиткой Паскаля в честь знаменитого французского физика и математика Блеза Паскаля (1623—1662), и покажем, как ее используют для решения трудных геометрических задач. Чтобы получить улитку Паскаля, поступим следующим образом. Возьмем окружность радиуса a и на ней некоторую точку A (рис. 29). Вокруг точки A будем вращать луч AC. Пусть его вторая точка пересечения с окружностью будет точка B. По обе стороны от точки B будем откладывать на луче один и тот же отрезок b. Геометрическое место концов этих отрезков M и M' и будет улиткой Паскаля.

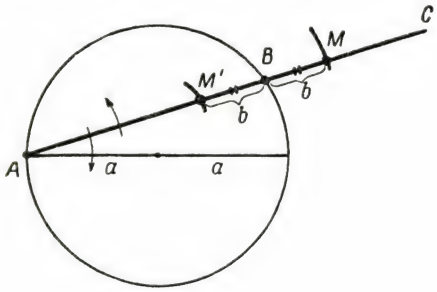


Рис. 29.

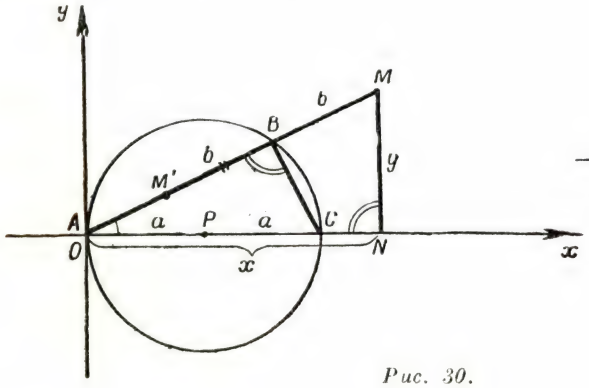


Рис. 30.

Составим уравнение улитки Паскаля. Для этого возьмем систему координат (рис. 30) и построим окружность радиуса a с центром в точке $P\ (a,\ 0)$. Точку A — центр вращения — расположим в начале координат. Пусть концами отрезка b, отложенного от точки B, будут точки M и M'. Они будут текущими точками улитки Паскаля. Обозначим координаты текущей точки M через x и y. (При выводе уравнения ради простоты мы будем рассматривать только одну точку M. Можно доказать, что и в этом случае мы получим уравнение всей улитки Паскаля.)

Для того чтобы вывести уравнение улитки, надо алгебраически записать через координаты x и y текущей ее точки то свойство, которое ее определяет.

Из рис. 30 видно, что треугольники ABC и ANM подобны, так как углы ABC и ANM прямые. Имеем:

$$\frac{AB}{AC} = \frac{AN}{AM}.$$

Но

$$AM = \sqrt{x^2+y^2},\ AN = x,\ AC = 2a,$$

$$AB = AM - BM = AM - b = \sqrt{x^2+y^2} - b.$$

Отсюда можем записать:

$$\frac{\sqrt{x^2+y^2} - b}{2a} = \frac{x}{\sqrt{x^2+y^2}}.$$

Освобождаясь от знаменателя, находим:

$$x^2 + y^2 - b\sqrt{x^2+y^2} = 2ax.$$

Переносим радикал в правую часть равенства, а $2ax$ — в левую и получаем:

$$x^2 + y^2 - 2ax = b\sqrt{x^2+y^2}.$$

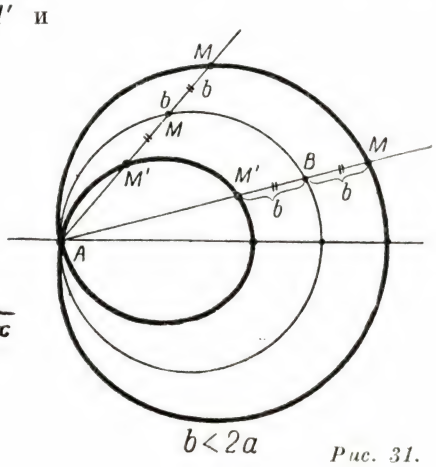


Рис. 31.

Чтобы избавиться от знака радикала, возводим обе части уравнения в квадрат. Находим: $(x^2+y^2-2ax)^2 = b^2(x^2+y^2)$. Это и есть уравнение улитки Паскаля. На рис. 31, 32, 33 построены три улитки Паскаля, согласно трем возможным случаям:

$b<2a$, $b=2a$, $b>2a$. (Для этого построения величинам a и b были приданы некоторые числовые значения, уравнение было разрешено относительно y, составлена таблица значений x и y, после чего по точкам построена каждая кривая.)

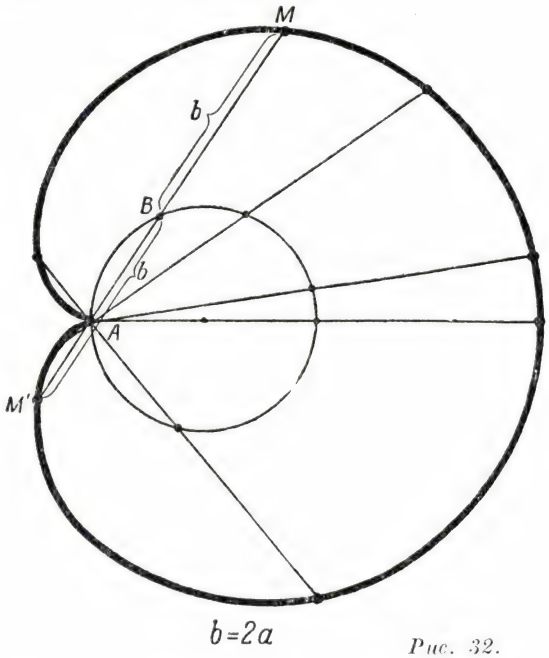


Рис. 32.

Особенно интересен тот случай, когда $b=a$. В этом случае улитка используется для решения задачи о трисекции угла.

ТРИСЕКЦИЯ УГЛА С ПОМОЩЬЮ УЛИТКИ ПАСКАЛЯ

Деление угла пополам (с помощью построения биссектрисы), как всем хорошо известно, выполняется очень просто. Однако задача о делении произвольного угла на три равные части (трисекция угла) оказывается очень сложной. Еще древние геометры пытались ее решить, выполняя для этого всевозможные построения с помощью линейки и циркуля. Однако, какие бы сложные построения они ни придумывали, задача не поддавалась их усилиям. В конце концов, они пришли к выводу, что такие инструменты, как линейка и циркуль, по которым можно вычертить только прямую и окружность, недостаточны для решения этой задачи. Поэтому они предложили использовать для ее решения новые инструменты, чертящие другие, более сложные кривые. Так, греческий геометр II в. до н. э. Никомед изобрел инструмент, называемый «конхоидальным циркулем», чертящий кривую конхоиду. С ее помощью произвольный угол можно разделить на

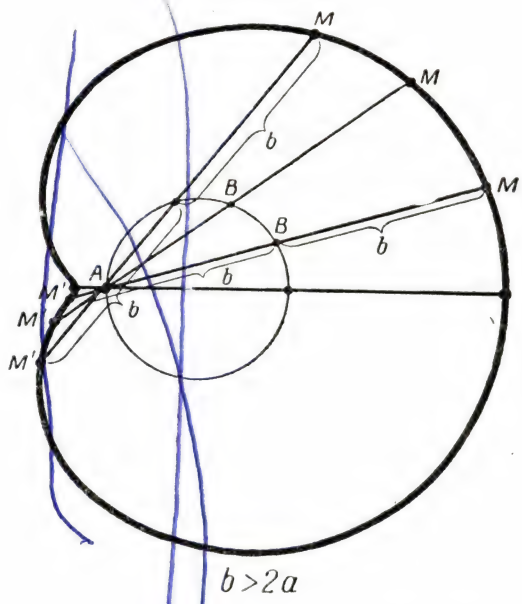


Рис. 33.

три равные части. Сейчас мы покажем, как можно разделить произвольный угол на три равные части с помощью улитки Паскаля, которую можно построить как с помощью таблицы по уравнению (что мы только что видели), так и с помощью специального инструмента.

Предварительно заметим, что некоторые определенные углы делятся на три равные части очень легко и обычными инструментами — линейкой и циркулем. Например, деление прямого угла на три равные части выполняется следующим образом (рис. 34). Строят прямоугольный треугольник, один из катетов которого (AB) равен половине гипотенузы (BC). Угол, противолежащий этому катету, будет равен 30°, т. е. $\frac{1}{3}$ прямого угла.

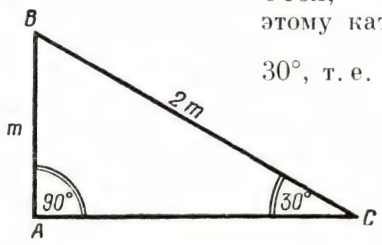


Рис. 34.

Невозможность деления произвольного угла на три равные части с помощью только линейки и циркуля была строго доказана (с использованием системы координат и уравнений кривых) лишь в XIX в.

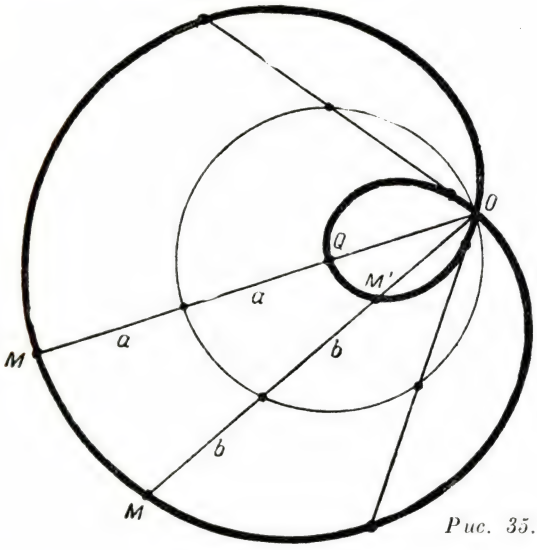


Рис. 35.

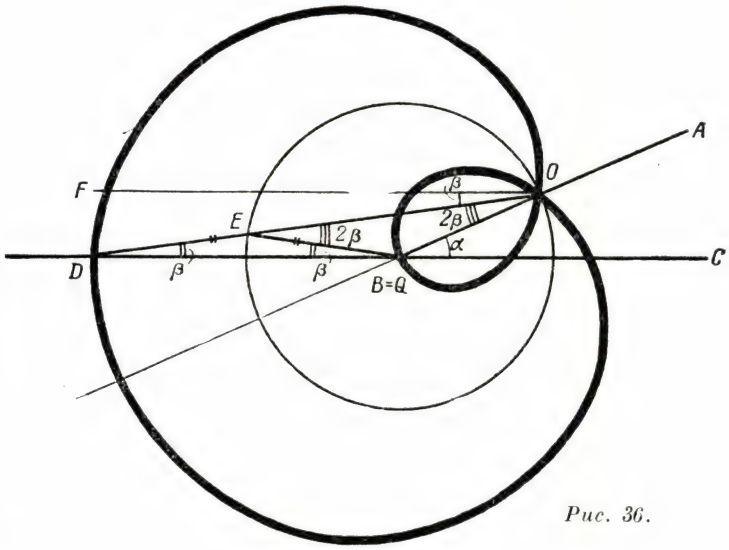


Рис. 36.

Теперь покажем, как делится на три равные части произвольный угол с помощью улитки Паскаля.

Пусть нам дан произвольный угол α. Требуется разделить его на три равные части. Предположим, что у нас на кальке или на прозрачной пластинке из пластмассы вычерчена улитка Паскаля при $b = a$ (рис. 35). Наложим эту улитку на угол α так (рис. 36), чтобы ее точка Q совпала с вершиной угла B, а отрезок OQ (радиус образующего круга улитки) пошел по стороне BA. Продолжим сторону BC за вершину B до пересечения с улиткой в точке D. Соединим точки O и D.

Докажем, что угол ODC и есть искомый, т. е. $\angle ODC = \frac{\alpha}{3}$. Для доказательства: 1) соединим точку E (в которой образующий круг пересекается с отрезком OD) с точкой B; 2) через точку O проведем прямую OF, параллельную прямой BC. Тогда $\angle FOB = \angle ABC = \alpha$. Обозначим $\angle ODB$ через β. Тогда: 1) $\angle EBD = \beta$, так как по свойству улитки $BO = BE = ED = a$ и треугольник DEB — равнобедренный; 2) $\angle OEB = 2\beta$, как внешний к треугольнику DEB; 3) $\angle BOE = 2\beta$, как угол при основании равнобедренного треугольника OBE, 4) $\angle DOF = \angle ODC = \beta$, как накрестлежащие углы при параллельных OF и DC. Тогда имеем: 5) $\angle FOB = 3\beta = \angle OBC = \alpha$, как накрестлежащие при тех же параллельных. Но теперь, если $3\beta = \alpha$, то $\beta = \frac{\alpha}{3}$ и правильность решения задачи доказана. Итак, угол α разделен на три равные части с помощью улитки Паскаля.

В заключение нашего рассказа о системе координат и ее использовании в геометрии мы можем сделать следующие выводы. Мы видели, что система координат позволяет строить графики всевозможных зависимостей и этим облегчает их понимание и использование; по заданным свойствам линий позволяет находить их уравнения и обратно, зная уравнения, позволяет по ним строить графики и изучать их свойства. Она дает общие способы для решения многих геометрических задач и доказательств теорем, сводя их к вычислительным задачам, разрешимым по общим правилам алгебры.

Система координат позволяет использовать в технике свойства различных линий. Пусть, например, требуется рассчитать на прочность какую-нибудь горизонтально лежащую балку в сооружении (например, балку моста, потолочного перекрытия и т. д.).

Решая эту задачу, инженер использует уравнение линии.

Он поступает так: исходя из нагрузки, которую должна выдержать балка, инженер составляет, по правилам механики, уравнение линии, по которой прогибается бал-

ка. Зная это уравнение, он уже без труда рассчитывает все необходимые размеры балки.

Система координат находит себе важнейшие применения не только почти во всех математических науках, но также и в тех науках, где используется математика. Так, почти все расчеты в механике, в астрономии, в геодезии, в географии основаны на системе координат. Достаточно сказать, что меридианы и параллели, которые мы видим на любой географической карте или на глобусе, составляют систему так называемых криволинейных координат.

Действительно, положение точки на земном шаре задается двумя числами — широтой и долготой, т. е. двумя координатами, а сами параллели и меридианы — кривые координатные линии.

Без преувеличения можно сказать, что огромное большинство расчетов, выполняемых в технике, использует систему координат.

Декартова система координат, о которой мы здесь говорили,— не единственная. Существуют и другие системы координат: аффинная, полярная и т. д.

Систему координат можно построить и в пространстве для решения задач стереометрии.

Все вопросы, связанные с применением системы координат и на плоскости и в пространстве, изучает раздел математики, называемый аналитической геометрией. Здесь мы остановились лишь на самых простых вопросах. Полный ее курс изучают студенты физико-математических факультетов университетов и технических вузов.

ФУНКЦИИ В ПРИРОДЕ И ТЕХНИКЕ

Одним из самых важных понятий в математике и ее приложениях является понятие функции. Всюду, где есть величины, связанные так, что с изменением одних меняются другие, мы имеем дело с функциями. Площадь квадрата является функцией длины его стороны; путь, пройденный телом при свободном падении,— функцией времени, протекшего от начала падения; сила тока — функцией от напряжения тока и сопротивления цепи, и т. д. Чаще всего функциональная зависимость выражается формулой (не следует думать, что это всегда так: температура воздуха есть функция от времени, так как с течением времени температура меняется, а связывающей их формулы не существует). Для многих вопросов физики достаточно линейной и квадратичной функций. Например, скорость при равномерноускоренном движении выражается линейной функцией $v=at$, а пройденный путь выражается квадратичной функцией $s=\frac{at^2}{2}$. Но есть случаи, где нужны другие функции. Особенно часто встречаются показательная и тригонометрические функции. Мы расскажем о некоторых из таких случаев.

ЧИСЛО e. НАТУРАЛЬНЫЕ ЛОГАРИФМЫ

При записи законов физики, связанных с показательной функцией, удобно пользоваться особым числом, которое называется числом e. Это число можно определить следующим образом. Начертим графики функций $y=a^x$ при разных значениях основания a. Чем больше это основание, тем круче поднимаются вверх графики (рис. 1). Эти графики в точке $A(0, 1)$ под разными углами пересекают ось Oy. Например, угол между осью Oy и кривой $y=2^x$ равен приблизительно $55°15'$, а для кривой $y=3^x$ этот угол равен примерно $42°20'$. Поэтому найдется такое число e, лежащее между 2 и 3, что кривая $y=e^x$ пересечет ось Oy под углом $45°$.

Более точные подсчеты показывают, что число e равно 2,71828... Логарифмы по основанию e называются натуральными логарифмами. Они обозначаются $\ln x$. Если мы знаем десятичный логарифм числа, то его натураль-

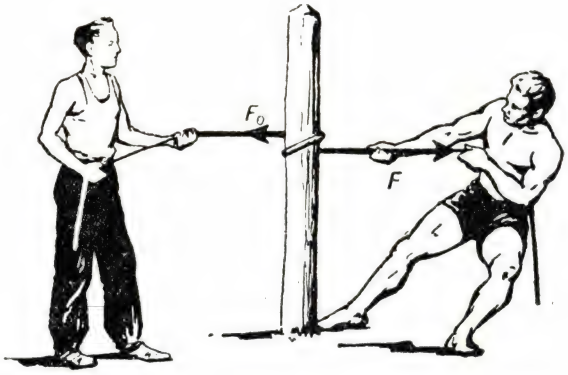
Рис. 1.

ный логарифм можно найти по формуле $\ln x = \frac{\lg x}{M}$, где $M = 0{,}43429...$

ОДИН ЧЕЛОВЕК МОЖЕТ УДЕРЖАТЬ КОРАБЛЬ

Когда корабль подходит к берегу, с него бросают на пристань канат. Здесь его обматывают несколько раз вокруг столба и таким образом удерживают им останавливающийся корабль. Как же удается одному человеку удержать корабль? Оказывается, ему помогает сила трения. Если обмотать канат один раз вокруг столба, то из-за трения каната о столб можно удержать силой F_0 силу F, бóльшую, чем F_0, в a раз. Отношение $\frac{F}{F_0} = a$ зависит от материала, из которого сделаны канат и столб. Например, если канат пеньковый, а столб железный, то $a = 3{,}5$. Иными словами, силой в 100 *кГ* можно уравновесить (используя «помощь» силы трения) силу в 350 *кГ*. Каждый новый оборот каната вокруг столба увеличивает отношение сил еще в a раз. Таким образом, если обернуть канат два раза, то отношение удерживаемой и удерживающей сил будет равно a^2, а если три раза, то $\frac{F}{F_0} = a^3$. Вообще, если число оборотов равно x (x может и не быть целым числом), то $\frac{F}{F_0} = a^x$. Если обмотать пеньковый канат вокруг железного столба два раза, то силой в 100 *кГ* можно уравновесить силу примерно в 1,2 *Т*, а при трехкратном обматывании — силу в 4,2 *Т*.

Один человек может удержать корабль.



Силач не может перетянуть канат, который без особого напряжения держит другой человек.

КАНАТ РАВНОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ РАЗРЫВУ

Канаты, на которых опускают груз в шахты, невыгодно делать одинаковой толщины на всем их протяжении. Ведь верхние части каната должны удерживать и вес груза, и вес нижних частей каната, а нижние части должны удерживать лишь опускаемый груз. Лучше всего придать канату такую форму, чтобы в любом его сечении на 1 *см*² приходилась одинаковая нагрузка. Расчеты показывают, что для этого площадь сечения каната должна изменяться по следующему закону:

$$S = S_0 e^{\frac{\gamma S_0 x}{P}},$$

где S_0 — площадь нижнего сечения каната, S — площадь сечения на расстоянии x от нижнего сечения, γ — удельный вес материала, из которого сделан канат, P — вес опускаемого груза. Вертикальный разрез такого каната имеет форму, изображенную на рис. 2. Такой канат называют канатом равного сопротивления разрыву. Канат равного сопротивления разрыву имеет меньший объем, чем канат с постоянным сечением, рассчитанный на такую же нагрузку, поэтому на него идет меньше материала.

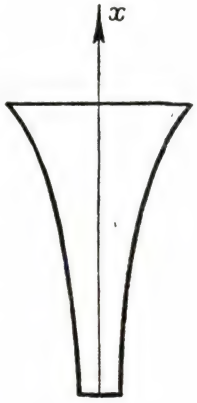


Рис. 2.

РАДИОАКТИВНЫЙ РАСПАД ВЕЩЕСТВА

Когда радиоактивное вещество распадается, его количество уменьшается. Через некоторое время останется половина первоначального количества вещества. Этот промежуток времени t_0 называется периодом полураспада вещества. Если пройдет еще t_0 лет, то из оставшейся половины распадется еще половина вещества и останется только четверть первоначального количества. Вообще через t лет масса m вещества будет равна

$$m = M\left(\frac{1}{2}\right)^{\frac{t}{t_0}},$$

где M — первоначальная масса вещества. Чем больше период полураспада, тем медленнее распадается вещество. Например, у урана-238 период полураспада равен 4,5 млрд. лет. Значит, за все время существования Земли не распалось еще и половины первоначального запаса урана. А вот у радия период полураспада равен всего 1590 годам. Если бы миллион лет назад вся Земля состояла из радия, то сейчас от нее не осталось бы и одного атома радия. Существует же он лишь потому, что при распаде урана все время появляются новые атомы радия.

ВКЛЮЧЕНИЕ И ВЫКЛЮЧЕНИЕ ПОСТОЯННОГО ТОКА

Если повернуть выключатель, то в то же мгновение загорается электрическая лампочка. Мы настолько привыкли к этому, что не задумываемся над тем, сразу ли сила тока принимает свое максимальное значение. Однако если собрать такую электрическую схему, как показано на рис. 3, и включить ток, то из-за наличия катушки сила тока будет нарастать медленно, так как в цепи возникнет ток самоиндукции, направленный в противоположную сторону. Расчеты показывают, что сила тока I зависит от времени по следующей формуле:

$$I = \frac{V_0}{R}\left(1 - e^{-\frac{R}{L}t}\right).$$

Здесь R — сопротивление цепи, L — самоиндукция катушки, V_0 — напряжение тока. Посмотрим, что будет происходить с силой тока с течением времени. Функцию $e^{-\frac{R}{L}t}$ можно записать в виде $\left(\frac{1}{e}\right)^{\frac{R}{L}t}$. Но $\frac{1}{e}$ меньше единицы, а известно, что показательная функция стремится к нулю с возрастанием показателя, если ее основание меньше единицы. Поэтому вычитаемое $e^{-\frac{R}{L}t}$ в формуле для силы тока будет уменьшаться, приближаться к нулю, и через некоторое время сила тока почти точно будет равна $\frac{V_0}{R}$.

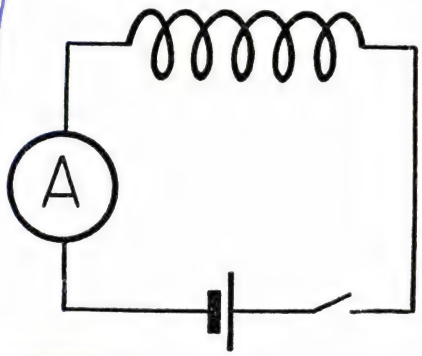


Рис. 3.

Это и есть то значение, которое известно из закона Ома. Разница между силой тока и значением $\frac{V_0}{R}$ станет такой маленькой, что никакие приборы ее не покажут.

На самом деле то же самое происходит при включении тока и без катушки самоиндукции. Но в этом случае самоиндукция L настолько мала, что функция $e^{-\frac{R}{L}t}$ почти мгновенно становится весьма малой.

Процесс выключения постоянного тока похож на процесс его включения. Он описывается даже более простой формулой: $I = \frac{V_0}{R}e^{-\frac{R}{L}t}$.

Мы уже говорили, что функция $e^{-\frac{R}{L}t}$ убывает и стремится к нулю, а потому через некоторое время после выключения тока приборы покажут, что в цепи тока нет.

ОСТЫВАНИЕ ЧАЙНИКА

Вы, конечно, замечали, что если снять кипящий чайник с огня, то сначала он быстро остывает, а потом остывание идет гораздо медленнее. Дело в том, что скорость остывания пропорциональна разности между температурой чайника и температурой окружающего воздуха, и чем меньше становится эта разность, тем медленнее остывает чайник. Если сначала температура чайника равнялась T_0, а температура воздуха

Чем больше чайник, тем значение k меньше и тем медленнее он остывает.

равнялась T_1, то через t секунд температура T чайника выразится формулой

$$T = (T_0 - T_1)\, e^{-kt} + T_1,$$

где k — число, зависящее от формы чайника и материала, из которого он сделан, и количества воды, которое в нем находится.

ПОЧЕМУ ПАРАШЮТИСТ ПАДАЕТ РАВНОМЕРНО

При падении тел в безвоздушном пространстве скорость их непрерывно возрастает. При падении тел в воздухе скорость падения тоже увеличивается, но не может превзойти определенной величины.

Парашютист опускается на землю равномерно.

Рассмотрим падение парашютиста. Если считать, что сила сопротивления воздуха пропорциональна скорости падения парашютиста, т. е. что $F=kv$, то через t секунд скорость падения будет равна

$$v = \frac{mg}{k}\left(1 - e^{-\frac{kt}{m}}\right)$$

(m — масса парашютиста). Обратите внимание на сходство этой формулы с формулой для силы тока. Через некоторый промежуток времени $e^{-\frac{kt}{m}}$ станет очень маленьким числом и скорость падения будет почти в точности равна $\frac{mg}{k}$, т. е. падение станет почти равномерным. Коэффициент пропорциональности k зависит от размеров парашюта.

Написанная формула пригодна не только для случая падения парашютиста, но и для изучения падения капель дождевой воды, пушинки и т. д. Из нее видно, что чем меньше отношение $\frac{mg}{k}$, тем медленнее падает тело. Этим и объясняется, почему пушинка падает медленнее камня: у нее маленькая масса, а площадь поверхности довольно большая, и воздух оказывает значительное сопротивление падению.

КАК ИЗМЕРЯЮТ ВЫСОТУ ПРИ ПОМОЩИ БАРОМЕТРА

Чем выше поднимаются в гору альпинисты, тем меньше становится давление воздуха. Этим можно воспользоваться для того, чтобы с помощью барометра определять высоту подъема. Как показывают расчеты, при постоянной температуре воздуха разность высот двух точек выражается такой формулой:

$$h_2 - h_1 = \frac{p_0(t^\circ + 273{,}1)}{W_0} \ln \frac{p_1}{p_2}.$$

Здесь p_1 и p_2 — давление воздуха на высотах h_1 и h_2, p_0 — давление воздуха на уровне моря, W_0 — вес 1 $м^3$ воздуха при температуре 0° и давлении p_0, t° — температура воздуха.

Эта формула верна для не слишком больших высот. Исследования, проведенные в Советском Союзе по программе Международного геофизического года при помощи ракет, показали, что на больших высотах имеют место другие законы изменения давления с высотой.

Вообще, любая физическая формула имеет ограниченную область применения — она верна

при одних условиях и перестает быть верной при других. Дело в том, что при выводе любой физической формулы делаются некоторые допущения, которые верны лишь приблизительно. Когда же эти допущения перестают быть верными, формула теряет силу.

СКОЛЬКО ТОПЛИВА ДОЛЖНА ВЗЯТЬ РАКЕТА

Много трудных математических задач приходится решать в теории межпланетных путешествий. Одной из них является задача об определении количества топлива, необходимого для того, чтобы придать ракете нужную скорость v. Это количество M зависит от массы m самой ракеты (без топлива) и от скорости v_0, с которой продукты горения вытекают из ракетного двигателя.

Если пренебречь сопротивлением воздуха и притяжением Земли, то количество топлива определится формулой

$$M = m(e^{\frac{v}{v_0}} - 1)$$

(формула К. Э. Циолковского). Например, для того чтобы ракете с массой 1,5 *т* придать скорость 8 *км/сек*, надо при скорости истечения газов 2 *км/сек* взять примерно 80 *т* топлива. Если бы удалось увеличить скорость истечения газов до 4 *км/сек*, то понадобилось бы всего 10 *т* топлива. Вообще чем с большей скоростью v_0 вытекают газы из ракеты, тем меньше будет $e^{\frac{v}{v_0}}$ и тем меньше понадобится топлива. Другой способ уменьшения количества топлива заключается в замене одноступенчатых ракет многоступенчатыми (подробнее о ракетах см. в статье «Советские ракеты и искусственные спутники Земли»).

ГАРМОНИЧЕСКИЕ КОЛЕБАНИЯ

Мы рассмотрели несколько примеров из физики и техники, в которых так или иначе встречается показательная функция. Сейчас мы перейдем к рассмотрению примеров, связанных с тригонометрическими функциями. Мы начнем с гармонических колебаний. Возьмем, например, гирю, подвешенную на пружине, и толкнем ее вниз. Сначала гиря будет опускаться, растягивая пружину. Чем ниже будет опускаться гиря, тем сильнее будет тянуть ее наверх пружина. Наконец, гиря израсходует всю свою энергию на растягивание пружины и остановится. Тогда пружина потянет гирю вверх. В силу инерции гиря не остановится в положении равновесия, а проскочит его и поднимется вверх настолько же, насколько она опустилась вниз (на самом деле она поднимется немного меньше из-за сопротивления воздуха и недостаточной упругости пружины, но мы пока не будем это учитывать). Поднимаясь вверх, гиря будет сжимать пружину, и, когда гиря остановится под действием сжатой пружины, она начнет опускаться вниз. В результате гиря будет совершать колебания вверх и вниз. График этого колебания имеет такой вид (рис. 4). Эта кривая называется синусоидой.

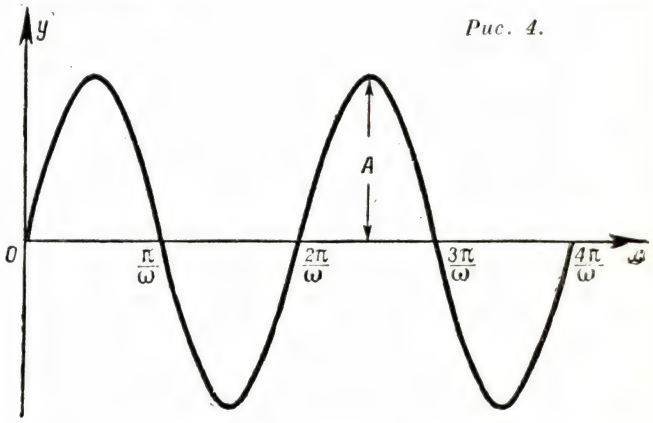


Рис. 4.

Как показывают расчеты, отклонение гири от положения равновесия выражается формулой $s = \frac{v_0}{\omega}\sin \omega t$. Здесь v_0 — скорость, с которой мы толкнули гирю, а $\omega = \sqrt{\frac{k}{m}}$, где m — масса гири и k — жесткость пружины (сила, которая нужна, чтобы растянуть пружину на 1 *см*). Колебания, происходящие по закону

$$s = A \sin \omega t, \qquad (1)$$

называются синусоидальными или гармоническими. Мы можем получить представление о таких колебаниях, следя за движением равномерно вращающейся точки и наблюдая это движение одним глазом сбоку (так, что глаз наблюдателя находится в плоскости вращения). Нам будет казаться, что точка не вращается, а движется то в одну сторону, то в другую.

Такую картину наблюдают астрономы, следя за движением спутников Юпитера, когда Земля находится в плоскости орбиты этих спутников.

Число A, называемое **амплитудой** синусоидального колебания, показывает размах этого колебания, а число ω, называемое **частотой** колебания, показывает, сколько колебаний происходит за 2π сек. (т. е. примерно за $\frac{44}{7}$ сек.). Каждые $\frac{2\pi}{\omega}$ сек. гиря будет возвращаться в исходное положение. Поэтому **период** ее колебания равен $\frac{2\pi}{\omega}$.

Если мы сначала отклоним гирю на s_0 *см*, а потом толкнем ее со скоростью v_0, то она будет совершать колебания по более сложному закону:

$$s = A \sin(\omega t + \alpha). \qquad (2)$$

Расчеты показывают, что амплитуда A этого колебания равна $\sqrt{s_0^2 + \frac{v_0^2}{\omega^2}}$, а число α таково, что $\operatorname{tg} \alpha = \frac{s_0 \omega}{v_0}$. Из-за слагаемого α это колебание отличается от колебания

$$s = A \sin \omega t.$$

На рис. 4 и 5 мы изобразили графики обоих колебаний. График колебания (2) получается из графика колебания (1) сдвигом влево на $\frac{\alpha}{\omega}$. Число α называют **начальной фазой**.

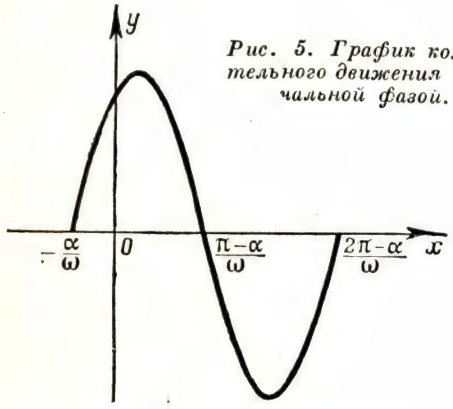


Рис. 5. График колебательного движения с начальной фазой.

КОЛЕБАНИЯ МАЯТНИКА

Колебания маятника тоже приближенно проходят по синусоидальному закону. Если эти колебания малы, то угол отклонения маятника приближенно выражается формулой

$$\varphi = \sin \varphi_0 t \sqrt{\frac{g}{l}},$$

где l — длина маятника, а φ_0 — наибольший угол отклонения. Чем длиннее маятник, тем медленнее он качается. Измеряя период колебания маятника известной длины, можно вычислять ускорение земного тяготения в различных точках земной поверхности.

РАЗРЯД КОНДЕНСАТОРА

Не только многие механические колебания происходят по синусоидальному закону. И в электрических цепях возникают синусоидальные колебания. Замкнем, например, цепь, изображенную на рис. 6. Сила тока в этой цепи будет изменяться по синусоидальному закону

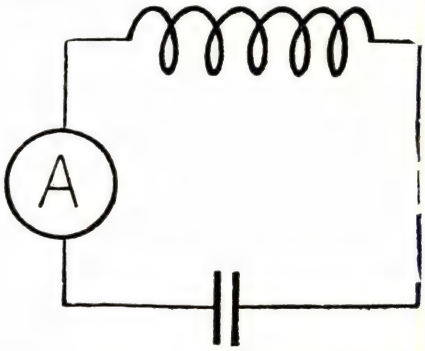


Рис. 6.

$$I = I_0 \sin(\omega t + \alpha).$$

Частота ω колебаний силы тока равна $\frac{1}{\sqrt{LC}}$, где C — емкость конденсатора, а L — самоиндукция цепи. Этот закон очень похож на закон колебаний гири, только вместо жесткости пружины надо взять величину, обратную емкости конденсатора, а вместо массы гири — самоиндукцию катушки.

НАПРЯЖЕНИЕ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

Когда рамка, изображенная на рис. 7, равномерно вращается в однородном магнитном поле, то в ней возникает переменный ток. Напряжение этого тока выражается формулой

$$V = \omega S H \sin \omega t,$$

где S — площадь рамки, H — напряженность магнитного поля, ω — угловая скорость вращения рамки, t — время.

КАК СОЕДИНИТЬ ДВЕ ТРУБЫ

Приведенные примеры могут создать впечатление, что синусоиды встречаются только в

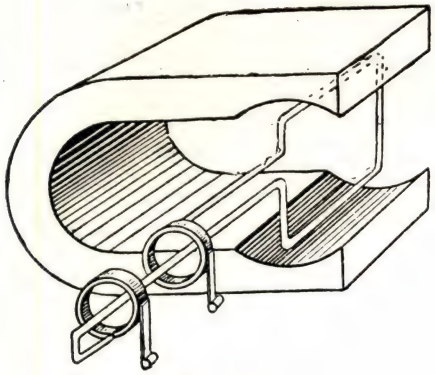
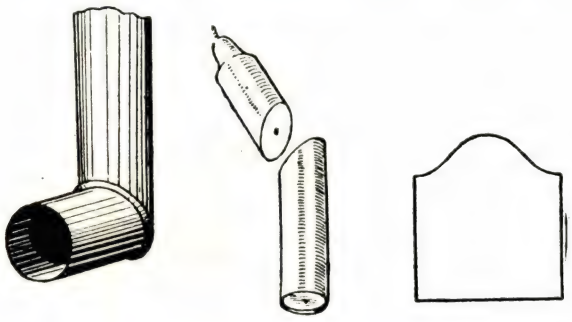


Рис. 7.

связи с колебаниями. Однако это не так. Например, синусоиды используются при соединении двух цилиндрических труб под углом друг к другу. Чтобы соединить две трубы таким образом, надо срезать их наискосок. Если развернуть срезанную наискосок трубу, то она окажется ограниченной сверху синусоидой. В этом можно убедиться, обернув свечку бумагой, срезав ее наискосок и развернув бумагу. Поэтому, чтобы получить ровный срез трубы, можно сначала обрезать металлический лист сверху по синусоиде, а потом свернуть его в трубу.



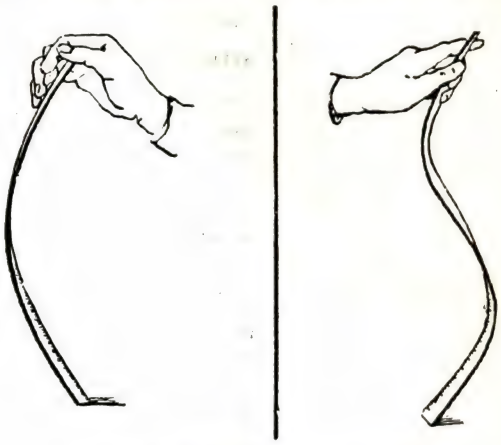
Чтобы получить ровный срез трубы, нужно ее край вырезать по синусоиде.

КАК ИЗГИБАЕТСЯ КОЛОННА

Синусоида встречается при рассмотрении изгиба колонны под действием вертикальной нагрузки. Если нагрузка слишком мала, колонна не изгибается совсем. Но если нагрузка достигнет некоторого значения, называемого критическим, то колонна начнет изгибаться, причем ее ось примет форму синусоиды. В этом можно убедиться на опыте, сгибая вместо колонны металлическую линейку. Критическая сила равна

$$F=\frac{\pi^2 EI}{l^2}$$

где l — высота колонны, а числа E и I зависят от материала колонны и размеров ее сечения. Из формулы видно, что чем длиннее колонна, тем меньшая сила нужна, чтобы ее согнуть. Это также можно проверить с помощью линейки.



Линейка изгибается по синусоиде.

Если вместо силы F, даваемой формулой, приложить вчетверо бо́льшую силу, то линейка изогнется не в виде полуволны синусоиды, а в виде целой волны синусоиды.

Формула критической силы была открыта великим математиком Л. Эйлером.

ЗАТУХАЮЩИЕ КОЛЕБАНИЯ

До сих пор, говоря о колебаниях маятника, гири, качающейся на пружине, и т. д., мы пренебрегали сопротивлением воздуха. На самом деле из-за сопротивления воздуха амплитуда колебаний становится все меньше и меньше, колебания затухают. Путь, который проходит точка, совершающая затухающие колебания, выражается такой формулой:

$$s=Ae^{-kt}\sin(\omega+t\alpha).$$

Так как множитель e^{-kt} уменьшается с течением времени, то размах колебаний становится все меньше и меньше. После каждого полного колебания амплитуда уменьшается в $e^{\frac{2\pi k}{\omega}}$ раз. Число $\frac{2\pi k}{\omega}$ называется логарифмическим декрементом затухающего колебания. Чем больше

логарифмический декремент, тем быстрее затухают колебания. Через некоторое время они станут такими маленькими, что приборы покажут полную остановку тела. График затухающего колебания изображен на рис. 8.

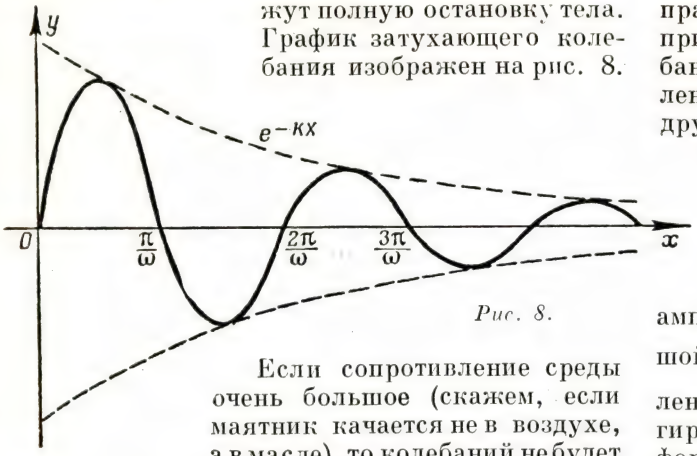


Рис. 8.

Если сопротивление среды очень большое (скажем, если маятник качается не в воздухе, а в масле), то колебаний не будет совсем — выведенный из положения равновесия маятник медленно будет опускаться, приближаясь к положению равновесия. В этом случае закон его движения задается формулой вида

$$s = A_1 e^{-k_1 t} + A_2 e^{-k_2 t},$$

где числа A_1 и A_2 зависят от начального положения и начальной скорости маятника.

При электрических колебаниях также происходят затухающие колебания из-за наличия сопротивления цепи.

ВЫНУЖДЕННЫЕ КОЛЕБАНИЯ

Рассмотрим снова гирю, качающуюся на пружине. Если не мешать ей качаться, то она будет совершать колебания с определенной частотой ω. Эта частота называется собственной частотой колебаний гири. Совсем по-другому будут выглядеть колебания гири, если мы будем раскачивать ее. Пусть раскачивающая сила сама изменяется по синусоидальному закону, т. е. тащит гирю то вверх, то вниз. Тогда гиря будет совершать колебания, получающиеся при сложении двух колебаний. Одно из них происходит с собственной частотой колебаний гири, а второе — с частотой раскачивающей силы. Если в начале колебаний гиря находится в состоянии покоя и раскачивающая сила изменяется по закону $F = A \sin \beta t$, то закон движения гири выразится формулой

$$s = \frac{A}{\omega^2 - \beta^2}\left[\sin \beta t - \frac{\beta}{\omega} \sin \omega t\right], \qquad (3)$$

где ω — собственная частота колебаний гири. График пути гири имеет уже довольно сложный вид. Дело в том, что функции $\sin \beta t$ и $\sin \omega t$ меняются с разной частотой. Поэтому иногда два колебания, в которых участвует гиря, направлены в разные стороны (так будет, например, в начале колебаний), и тогда эти колебания гасят друг друга. Иногда же они направлены в одну сторону, и тогда они усиливают друг друга.

Наибольшая амплитуда колебаний равна примерно $\left|\frac{A}{\omega(\omega-\beta)}\right|$. Отсюда видно, что если β мало отличается от ω (т. е. если частота раскачивающей силы мало отличается от собственной частоты колебаний гири), то амплитуда колебаний может стать очень большой (у дроби $\left|\frac{A}{\omega(\omega-\beta)}\right|$ знаменатель будет маленьким). Если $\omega = \beta$ (т. е. если мы раскачиваем гирю в такт ее собственным колебаниям), то формула (3) уже не применима. В этом случае закон движения гири имеет вид

$$s = \frac{A}{2\omega^2}\left[\sin \omega t - \omega t \cos \omega t\right].$$

Размах колебаний с течением времени увеличивается, и гиря может разорвать пружину. Это явление называется резонансом.

СЛОЖЕНИЕ КОЛЕБАНИЙ

Иногда одно и то же тело участвует не в одном колебательном движении, а в нескольких. Подвесим, например, гирю A на пружине, а к ней также на пружине подвесим другую гирю B (рис. 9). Если растянуть обе пружины и отпустить их, то колебания гирь A и B будут весьма сложными. Например, колебания гири B вызываются, во-первых, тем, что гиря A то поднимается, то опускается, а во-вторых, тем, что пружина AB то растягивается, то сокращается. Мы говорим в этом случае, что колебание гири B является суммой двух колебаний — движения гири A и колебания гири B относительно гири A.

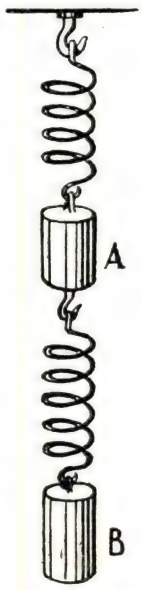


Рис. 9.

Можно привести и другие примеры сложения колебаний. Когда играет оркестр, то каждый музыкальный инструмент вызывает свои колебания воздуха. Эти колебания складываются друг с другом и доносятся к нам в виде единого аккорда.

Чаще всего складываются гармонические колебания. Если эти колебания имеют одну и ту же частоту, то и сумма их будет гармоническим колебанием той же частоты. Пусть, например, складываются гармонические колебания $s_1 = A_1 \sin(\omega t + \alpha_1)$ и $s_2 = A_2 \sin(\omega t + \alpha_2)$. Их суммой будет колебание

$$s = A_1 \sin(\omega t + \alpha_1) + A_2 \sin(\omega t + \alpha_2).$$

Эту сумму можно изобразить в виде одного колебания

$$s = A \sin(\omega t + \alpha),$$

амплитуда A которого равна

$$A = \sqrt{A_1^2 + A_2^2 + 2A_1A_2\cos(\alpha_1 - \alpha_2)},$$

а начальная фаза α определяется равенством

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{A_1 \sin\alpha_1 + A_2 \sin\alpha_2}{A_1 \cos\alpha_1 + A_2 \cos\alpha_2}.$$

Вместо столь сложных формул для сложения колебаний можно пользоваться простым геометрическим правилом. Здесь нам приходят на помощь векторы[1]. Оказывается, что не только силу, скорость и ускорение, но и гармонические колебания можно изображать векторами. Гармоническое колебание с амплитудой A и начальной фазой α изображается вектором длины A, наклоненным к оси Ox под углом α (рис. 10).

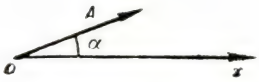


Рис. 10.

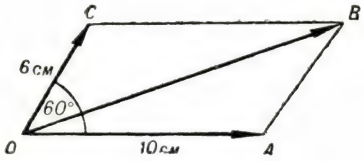


Рис. 11.

При сложении колебаний изображающие их векторы складываются по правилу параллелограмма. На рис. 11 показано сложение колебаний $s_1 = 10 \sin \omega t$ и $s_2 = 6 \sin\left(\omega t + \frac{\pi}{3}\right)$. Измеряя диагональ OB параллелограмма $OABC$, мы находим, что амплитуда суммы этих колебаний равна примерно 14. Начальная же фаза этого колебания равна углу AOB, т. е. примерно 22°, или 0,37 радиана. Поэтому

$$s = 10 \sin \omega t + 6 \sin\left(\omega t + \frac{\pi}{3}\right) \approx 14 \sin(\omega t + 0{,}37).$$

Особенно просто складывать колебания с одинаковой начальной фазой — в этом случае оба вектора направлены в одну и ту же сторону и в сумме получится просто колебание с той же фазой, амплитуда которого равна сумме амплитуд слагаемых. А если углы α_1 и α_2 отличаются друг от друга на π радиан (т. е. на 180°), то в результате сложения колебаний получится колебание, амплитуда которого равна разности амплитуд слагаемых. Может получиться даже, что колебания погасят друг друга (одно будет тянуть в одну сторону, а другое — в другую, совсем как Лебедь, Рак и Щука из басни Крылова). Такое явление называется в физике интерференцией колебаний. Из-за интерференции может получиться так, что точка, освещенная двумя источниками света, окажется неосвещенной — два света дадут в сумме темноту.

БИЕНИЯ

Довольно сложная картина возникает, когда складываются колебания различной частоты. Сложим, например, колебания $s_1 = A \sin \omega_1 t$ и $s_2 = A \sin \omega_2 t$, имеющие одинаковую амплитуду, но разную частоту. В результате получится колебание

$$s = A\,(\sin \omega_1 t + \sin \omega_2 t). \qquad (4)$$

Это колебание можно записать также в виде

$$s = 2A \sin \frac{\omega_1 + \omega_2}{2} t \cos \frac{\omega_1 - \omega_2}{2} t.$$

Множители $\sin \frac{\omega_1 + \omega_2}{2} t$ и $\cos \frac{\omega_1 - \omega_2}{2} t$ ведут себя совсем по-разному. Если частоты ω_1 и ω_2 близки друг к другу, то множитель $\cos \frac{\omega_1 - \omega_2}{2} t$ будет медленно изменяться (частота его изменения равна $\frac{|\omega_1 - \omega_2|}{2}$). Колебание же $\sin \frac{\omega_1 + \omega_2}{2} t$ имеет большую частоту $\frac{\omega_1 + \omega_2}{2}$. Поэтому колебание (4) имеет как бы вид синусоидального колебания с медленно меняющейся амплитудой. Такие колебания называются биениями. Например, если играют два музыкальных инструмента на близких нотах, имеющих частоты ω_1 и ω_2, то, кроме этих двух нот, мы услышим еще ноту с частотой $\frac{|\omega_1 - \omega_2|}{2}$. Композиторам приходится учитывать это явление. Но не только композиторам, а и техникам приходится иметь дело с биениями. Например, при проектировании двухвинтовых кораблей приходится учи-

[1] Подробнее о векторах см. в статье «Геометрическая алгебра».

тывать, что, кроме колебаний с частотами ω_1 и ω_2, вызываемыми работой винтов, возникает еще колебание с частотой $\frac{|\omega_1-\omega_2|}{2}$. Если частота этого колебания совпадет с частотой собственных колебаний какой-нибудь детали корабля, могут возникнуть вынужденные колебания с большой амплитудой. Биения можно наблюдать и при горении лампочки накаливания, если две динамо-машины переменного тока соединены вместе.

ПРИЛИВЫ И ОТЛИВЫ

Очень интересный пример биений дают океанские приливы и отливы. Из-за притяжения Луны и Солнца уровень воды в океане все время меняется. Примерно каждые 12 часов уровень воды достигает наивысшего значения, а через 6 часов после этого — наинизшего. Однако период колебаний уровня воды, вызываемых притяжением Солнца, не совпадает в точности с периодом колебаний уровня воды, вызываемых притяжением Луны. Первый период равен 12 часам, а второй — 12 часам 25 минутам. В результате сложений этих колебаний, имеющих близкие периоды (а значит, и близкие частоты), получаются биения. Самая большая высота приливов будет в том случае, если Солнце, Земля и Луна расположены так, как на рис. 12*а*; самая маленькая,— если они расположены так, как на рис. 12*б*. Самая большая высота приливов превосходит примерно в два с третью раза самую маленькую.

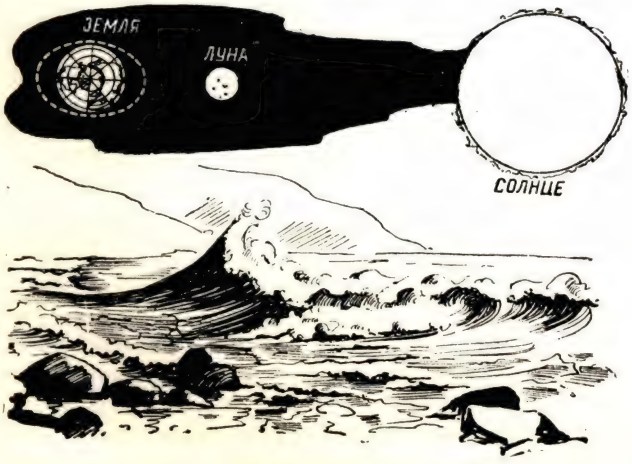


Рис. 12а.

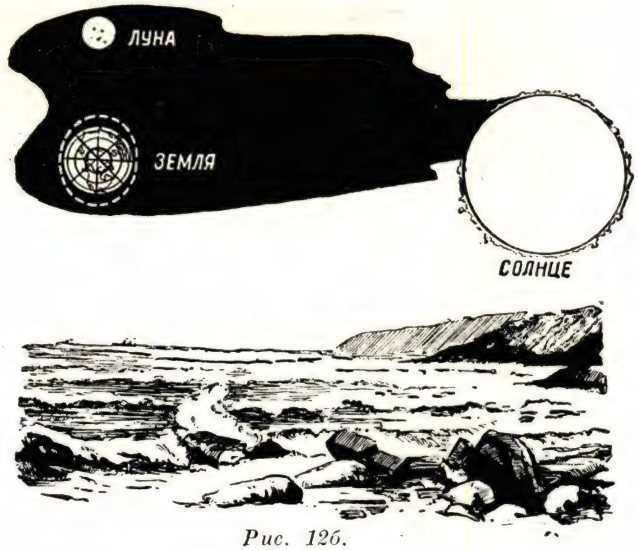


Рис. 12б.

МОДУЛИРОВАНИЕ КОЛЕБАНИЙ

Колебания с периодически меняющейся амплитудой применяются в радиотехнике. Радиостанции посылают в пространство электромагнитные колебания с очень большой частотой (от 150 тыс. до 15 млн. колебаний в секунду). Амплитуда же этих колебаний меняется примерно с частотой звуковых колебаний (несколько сотен или тысяч колебаний в секунду). Изменение амплитуды колебаний называется амплитудным модулированием этих колебаний [1].

РАЗЛОЖЕНИЕ ПЕРИОДИЧЕСКИ МЕНЯЮЩЕЙСЯ СИЛЫ НА ГАРМОНИЧЕСКИЕ СОСТАВЛЯЮЩИЕ

Как мы узнали, из гармонических колебаний составляются более сложные колебания. При этом могут получаться колебания весьма сложного вида. Но часто приходится решать обратную задачу — разлагать сложные колебания на простые, синусоидальные. Пусть, например, на гирю действует раскачивающая сила, периодически меняющая свое направление. При этом в течение некоторого времени T гирю толкают с постоянной силой F_0 в одну сторону, а потом в течение такого же промежутка времени ее толкают с той же силой в обратную сторону. Если мы будем повторять эти действия, то график изменения силы примет такой вид, как это показано на рис. 13.

[1] Подробнее о модулировании электромагнитных колебаний см. в статье «Физические основы радио».

Возникает вопрос: как рассчитать действие этой силы на гирю? Оказывается, что любую периодически меняющуюся силу можно с любой степенью точности представить как сумму нескольких сил, меняющихся по синусоидальному закону. Например, силу F_0, изображенную на рис. 13, можно приближенно представить как сумму трех сил, меняющихся по таким законам:

$$F_1 = \frac{4F_0}{\pi}\sin\frac{\pi t}{T};\ F_2 = \frac{4F_0}{3\pi}\sin\frac{3\pi t}{T} \text{ и } F_3 = \frac{4F_0}{5\pi}\sin\frac{5\pi t}{T}.$$

Если сложить эти силы, то получится график, очень напоминающий график на рис. 13. Если мы захотим еще точнее изобразить силу, изображенную на графике, то надо к силе $F_1 + F_2 + F_3$ прибавить силу $F_4 + F_5 + \ldots + F_n$, где

$$F_n = \frac{4F_0}{(2n-1)\pi}\sin\frac{(2n-1)\pi t}{T}.$$

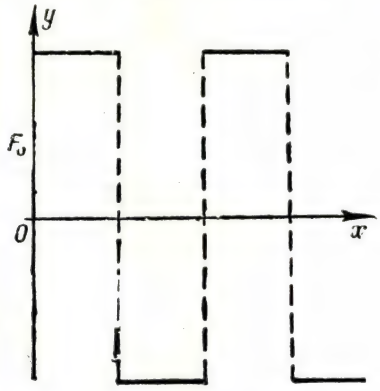


Рис. 13.

Когда раскачивающая сила изображена в виде суммы синусоидальных сил, подсчитывают действие каждой синусоидальной силы так, как об этом рассказано выше, и складывают все полученные результаты. Эта сумма и покажет действие данной раскачивающей силы.

СПЕКТРАЛЬНЫЙ АНАЛИЗ

Разложение периодических процессов на сумму синусоидальных процессов применяется не только при изучении механических колебаний, но и во многих других областях физики, техники и даже искусства. Самый простой пример такого разложения дает спектроскоп. Если направить на него луч белого света, то получается радужная полоска — спектр. Каждый цвет спектра соответствует синусоидальным электромагнитным колебаниям, имеющим определенную частоту. Таким образом, спектроскоп разлагает сложное электромагнитное колебание — белый свет — на синусоидальные колебания. Измеряя энергию в различных частях спектра, можно узнать, какие синусоидальные колебания, входящие в разлагаемый свет, имеют бóльшую амплитуду, а какие — меньшую.

Часто всякое разложение периодического колебания на синусоидальные называют спектральным анализом или спектральным разложением. Спектральный анализ применяется также к звукам и другим колебаниям. С помощью спектрального анализа удается установить особенности тембра певца и т. д.

В технике пользуются спектральным анализом колебаний для того, чтобы правильно рассчитывать различные конструкции. Например, может случиться, что частота одной из синусоидальных составляющих колебаний самолета, вызванных работой моторов, совпадет с собственной частотой колебаний какой-нибудь детали самолета. Тогда из-за резонанса при работе моторов возникнут сильные колебания этой детали, что может привести к аварии.

КАК МАШИНА ОТКРЫЛА ТЕОРЕМУ

Для разложения периодических колебаний на синусоидальные составляющие применяются различные машины. Есть машины, которые решают и обратную задачу — позволяют из синусоидальных составляющих складывать всё колебание. Однажды для проверки работы такой машины ей дали разложить на синусоидальные составляющие колебание, изображенное на рис. 13, а потом сложить эти составляющие. Машина после суммирования начертила график не такой, как на рис. 13, а такой, как на рис. 14, т. е. с добавочными хвостиками на вертикальных отрезках. Сначала появление этих хвостиков приписывали несовершенству машины и думали, как ее исправить. Но потом один

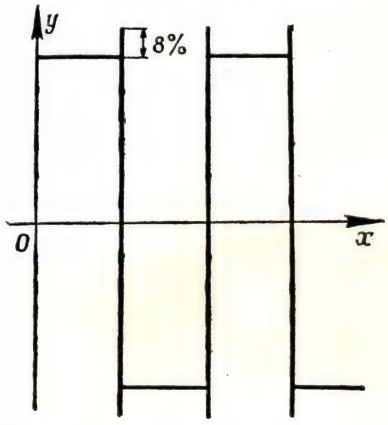


Рис. 14.

математик (Гиббс) доказал, что эти хвостики должны появляться всегда, когда у колебания есть разрывы. Теорему назвали его именем, хотя «открыла» ее машина.

ПОЧЕМУ НЕ РАБОТАЛ ТРАНСАТЛАНТИЧЕСКИЙ КАБЕЛЬ

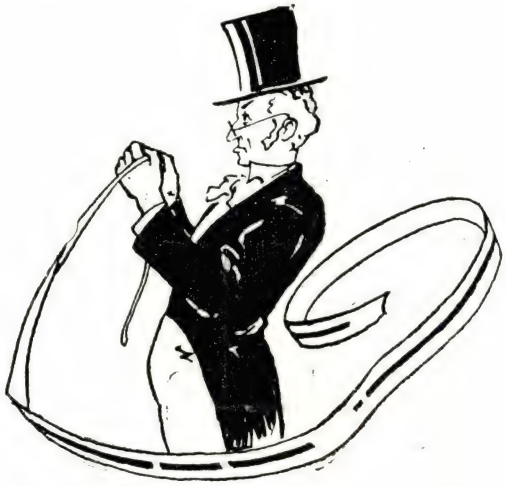
Когда проложили телеграфный кабель через Атлантический океан, то оказалось, что по нему нельзя передавать телеграммы. Вместо

На одном конце кабеля передавали сигналы.

точек и тире на другом конце кабеля получались совершенно непонятные сигналы. Исследованием работы кабеля занялся известный английский физик и математик Кельвин. Для этого он сначала разложил сигналы на синусоидальные составляющие и изучил, как передаются по кабелю эти составляющие. Оказалось, что колебания различной частоты передаются поразному. Одни из них идут быстрее, другие медленнее, одни сильно ослабевают, а другие меньше. Поэтому когда эти составляющие приходят на другой конец кабеля, то их сумма становится совсем непохожей на передававшиеся сигналы. Кельвин нашел, от чего зависит изменение скорости и силы синусоидальных колебаний, и указал, как сделать кабель, чтобы колебания любой частоты шли по нему с одинаковой скоростью и одинаково ослабевали. Когда по его указаниям переделали кабель, сигналы стали передаваться без искажений и трансатлантическая связь наладилась.

РАДИОПРИЕМНИК И КАМЕРТОН

Иногда вместо разложения колебания на синусоидальные составляющие стараются выделить из всего колебания одну составляющую определенной частоты. Именно это делают, когда настраивают радиоприемник на определенную частоту; из сложного электромагнитного колебания, вызванного работой всех радиостанций, ловят колебание, вызванное работой нужной станции. Точно так же камертон отзывается только на ту ноту, на которую он настроен.



На другом конце кабеля получали сигналы, которые нельзя было понять.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Поистине безгранична область применений показательной и тригонометрической функций в природе и технике! Вероятно, можно было бы заполнить весь этот том Детской энциклопедии, рассказывая о таких примерах. Возникают естественные вопросы: что же общего между такими вещами, как трение каната о столб, радиоактивный распад, канат равного сопротивления разрыву и т. д.? Почему электромагнитные колебания так похожи на механические колебания? Почему столь часто встречаются в различных вопросах науки и техники именно эти функции?

Сейчас мы не можем ответить на эти вопросы. Но в конце следующей статьи, посвященной одному из разделов высшей математики, мы поговорим и об этом.

ИНТЕГРАЛ И ПРОИЗВОДНАЯ

ЗАДАЧА КЕПЛЕРА

Если бы бочки умели говорить, то, несомненно, многие из них с удовольствием рассказали бы поучительную историю о великих заслугах бочек в создании... высшей математики! История эта такова.

В ноябре 1613 г. королевский математик и астролог австрийского двора Иоганн Кеплер праздновал свадьбу. Готовясь к ней, он приобрел несколько бочек виноградного вина. При покупке Кеплер был поражен тем, что продавец определял вместимость бочки, производя одно единственное действие,— измеряя расстояние от наливного отверстия до самой дальней от него точки днища (рис. 1). Ведь такое измерение совсем не учитывало форму бочки! Кеплер сразу увидел, что перед ним интереснейшая математическая задача — по нескольким измерениям вычислить вместимость бочки. Размышляя над этой задачей, он нашел формулы не только для объема бочек, но и для объема самых различных тел: «лимона», «яблока», «айвы» и даже «турецкой чалмы» (рис. 2). Для каждого из тел Кеплеру приходилось создавать новые, зачастую очень хитроумные методы.

В наши дни вычислять объемы различных тел (значительно более сложных, чем у Кеплера) необходимо при решении многих технических задач: при нахождении объема корпуса корабля, объема газгольдера сложной формы, объема водохранилища и др. И решать такие задачи приходится почти каждому инженеру, каждому технику. Простые и общие методы решения подобных задач даются высшей математикой.

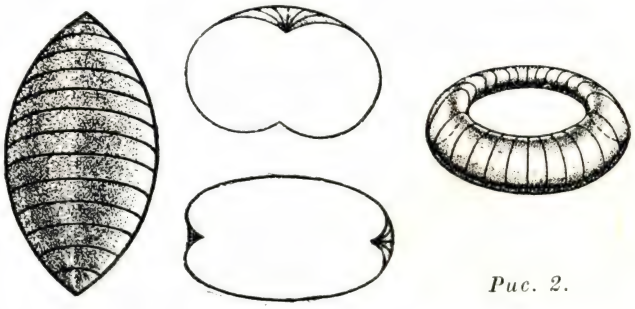


Рис. 2.

МАТЕМАТИКА ЗА ЧАЙНЫМ СТОЛОМ

Чтобы получить представление об этих общих методах, попробуем найти (хотя бы приблизительно) объем поданного к столу лимона. Ни на одно из тел, изучаемых в школе (шар, цилиндр, конус и т. д.), лимон не похож. Однако хозяйка тут же приходит нам на помощь: она разрезает лимон на тонкие ломтики. Ровно обрезав край каждого ломтика, можно превратить его в низенький цилиндр (рис. 3), объем которого легко высчитать. Прикладывая друг к другу эти цилиндры, мы получим «ступенчатое тело» (рис. 4). Его объем равен сумме объемов цилиндров. Если ломтики очень тонки, то объем ступенчатого тела мало отличается от объема лимона и чем тоньше будут ломтики, тем это отличие будет меньше.

Рис. 1.

ОБЪЕМ ТЕЛА

Прием, примененный нами для вычисления объема лимона, пригоден для вычисления объема любого тела вращения. Пусть фигура $ABCD$ (рис. 5) вращается вокруг стороны AB. Разрежем получающееся тело вращения (рис. 6) на тонкие ломтики, и каждый ломтик заменим цилиндром. Тогда мы легко можем найти объем получающегося ступен-

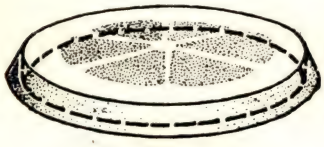


Рис. 3.

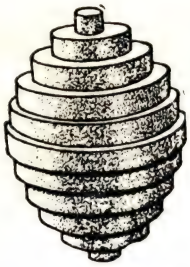


Рис 4.

Рис. 5.

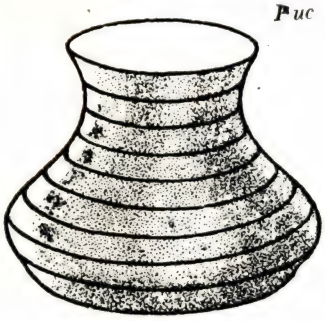


Рис. 6.

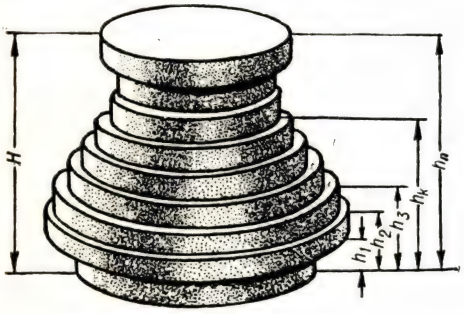


Рис. 7.

чатого тела (рис. 7). Для этого нам надо знать, как меняется площадь сечения с высотой (рис. 8). Пусть площадь сечения, проведенного на высоте h, равна $S(h)$. Предположим, кроме того, что тело разрезано на n ломтиков сечениями, проведенными на высотах $h_0, h_1, \ldots, h_n$ над плоскостью

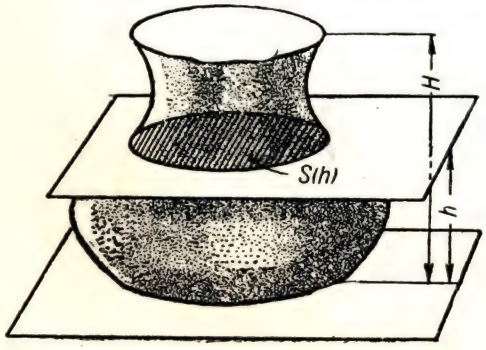


Рис. 8.

нижнего основания (плоскость нижнего основания совпадает с сечением на высоте h_0, а плоскость верхнего — с сечением на высоте h_n, т. е. $h_0 = 0$, $h_n = H$) (рис. 7). Площадь сечения на высоте h_k равна $S(h_k)$. Поэтому объем цилинд-

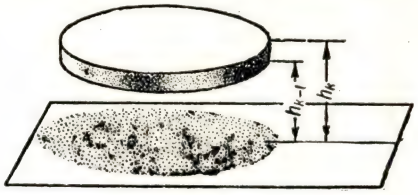


Рис. 9.

ра, которым мы заменяем k-й ломтик (рис. 9), будет равен $S(h_k)(h_k - h_{k-1})$ (так как его высота равна $h_k - h_{k-1}$). Складывая объемы этих цилиндриков, мы получим объем всего ступенчатого тела:

$$V_{\text{ступ. тела}} = S(h_1)(h_1 - h_0) + S(h_2)(h_2 - h_1) + \ldots$$
$$\ldots + S(h_n)(h_n - h_{n-1}).$$

Чем тоньше будут ломтики, тем ближе объем ступенчатого тела к объему тела вращения.

Таким же образом можно найти объем любого тела, если известно, как меняется площадь тела с высотой сечения. Например, для того чтобы вычислить объем проектируемого корабля, достаточно иметь чертежи (выполненные в определенном масштабе) поперечных разрезов корабля. По этим чертежам надо найти площадь каждого разреза (как вычислять площади сложных фигур, мы расскажем на следующей странице), после чего указанная выше формула даст приблизительное значение объема корабля. Разумеется, таким же приемом можно находить объемы газгольдеров, водохранилищ и других тел.

ПРОМЕР РЕКИ

При проектировании гидроэлектростанций надо знать расход воды в реке, т. е. количество воды, протекающей в данном месте за 1 сек. Ясно, что расход воды в реке равен произведению площади поперечного сечения реки на скорость течения. Скорость течения определить довольно просто, а вот площадь поперечного сечения найти гораздо сложнее. Однако и здесь на помощь нам приходит разрезание на «ломтики». Каждый «ломтик» можно приближенно заменить прямоугольником. Складывая затем площади этих прямоугольников, мы и найдем приближенное значение площади сечения. Чем тоньше будут «ломтики», тем более

точное значение площади мы получим. Измерим глубину реки в точках, находящихся на расстоянии x_0, x_1, ..., x_n от берега ($x_0 = 0$; $x_n = H$ есть ширина реки). Пусть на расстоянии x_k от берега глубина равна $f(x_k)$ (рис. 10). Тогда площадь поперечного сечения приблизительно равна

$$S_{\text{поп. сеч.}} \approx f(x_1)(x_1 - x_0) + f(x_2)(x_2 - x_1) + \ldots$$
$$\ldots + f(x_n)(x_n - x_{n-1}).$$

Вообще если геометрическая фигура имеет вид, изображенный на рис. 11 (такая фигура называется криволинейной трапецией), и если высота в точке с абсциссой x равна $f(x)$, то для вычисления площади фигуры мы можем пользоваться той же формулой. Чем «гуще» расположены точки x_0, x_1, ..., x_n на отрезке AB, тем более точное значение для площади фигуры мы получаем по этой формуле.

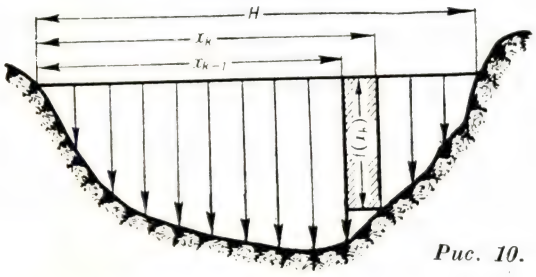
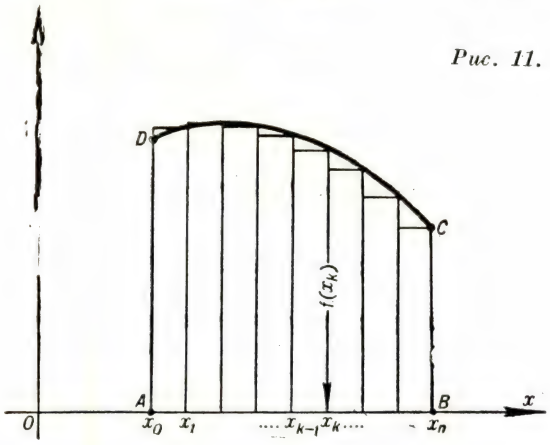


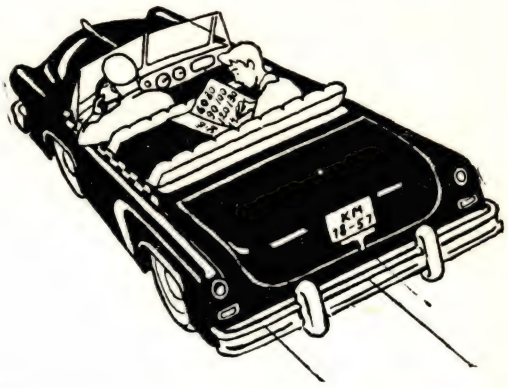
Рис. 10.

Рис. 11.



В АВТОМОБИЛЕ

Для измерения пути, пройденного автомобилем, на нем устанавливают специальный счетчик. Но, даже если этот счетчик испорчен, можно подсчитать пройденный автомобилем путь по спидометру (прибору, показывающему скорость автомобиля).



Для этого надо записать показания спидометра в моменты времени $t_0 = 0, t_1, t_2, \ldots, t_n = T$. Если бы движение автомобиля от момента t_{k-1} до момента t_k совершалось равномерно с той скоростью $v(t_k)$, которую он в действительности имел в конце этого промежутка, т. е. в момент t_k, то за промежуток времени от t_{k-1} до t_k он проехал бы расстояние $v(t_k)(t_k - t_{k-1})$. Поэтому путь, пройденный за все время движения от 0 до T, был бы равен

$$v(t_1)(t_1 - t_0) + v(t_2)(t_2 - t_1) + \ldots + v(t_n)(t_n - t_{n-1}).$$

Этой формулой можно пользоваться для приближенного подсчета пути, пройденного автомобилем. Она, конечно, лишь приближенная. Автомобиль не всегда движется равномерно, и даже за маленький промежуток времени скорость его успевает несколько раз измениться. Однако чем чаще мы будем записывать показания спидометра, т. е. чем меньше будут промежутки времени между отдельными измерениями, тем точнее написанная формула будет давать действительное значение пути, пройденного автомобилем.

РАБОТА ПАРОВОЗА

Теперь посмотрим на движущийся поезд. Когда поезд движется, паровоз совершает некоторую работу. Если бы весь путь был совершенно одинаковым, то эту работу было бы легко сосчитать, умножив силу тяги паровоза на длину пути. Но в некоторых местах дорога идет вверх, в других — под уклон, в одних местах дорога в хорошем состоянии, в других — в худшем, и потому в одной точке пути паровоз развивает одну силу тяги, а в другой — другую. Иначе говоря, сила тяги является функцией $F(l)$ от расстояния l, пройденного паровозом с момента отъезда. Чтобы найти работу паровоза, надо разбить весь путь на маленькие участки

точками, находящимися от начальной точки пути на расстояниях $l_0 = 0$, $l_1, \ldots, l_n = L$ (где L — длина всего пройденного пути). На каждом участке от точки l_{k-1} до точки l_k можно считать силу тяги приблизительно постоянной и равной $F(l_k)$. Следовательно, работа на этом участке приблизительно равна $F(l_k)(l_k - l_{k-1})$, а для всей работы получаем приближенное значение

$$A \approx F(l_1)(l_1 - l_0) + F(l_2)(l_2 - l_1) + \ldots$$
$$\ldots + F(l_n)(l_n - l_{n-1}).$$

Чем гуще мы будем брать точки l_0, $l_1 \ldots$, l_n, тем точнее получим значение работы паровоза. Аналогично вычисляется работа переменной силы и в других случаях.

ИНТЕГРАЛ

Мы разобрали много задач из различных областей физики, техники, геометрии. Несмотря на внешнее различие этих задач, у них было много общего. Каждый раз для приближенного вычисления некоторой величины (работы, объема, площади, пути и т. д.) мы получали сумму вида

$$f(x_1)(x_1 - x_0) + f(x_2)(x_2 - x_1) + \ldots$$
$$\ldots + f(x_n)(x_n - x_{n-1}).$$

Здесь $f(x)$ — некоторая функция, заданная на отрезке от a до b, а $x_0 = a$, $x_1, \ldots, x_{n-1}, x_n = b$ — точки на этом отрезке. Например, при вычислении пути функция $f(x)$ была скоростью в момент времени x (только время мы раньше обозначали буквой t, а не x, что, конечно, несущественно), a было равно нулю, а b равнялось времени T движения автомобиля; при вычислении работы функция $f(x)$ была силой тяги, а числа a и b означали начальную и конечную точки пути, и т. д.

Суммы такого вида встречаются в математике и ее приложениях очень часто. Их называют **интегральными суммами**. Такие суммы дают значение искомой величины только приближенно. Но если мы будем брать точки $x_0, x_1, \ldots, x_n$ все гуще и гуще на отрезке от a до b, то интегральные суммы будут приближаться к некоторому числу, а именно к точному значению искомой величины. Это число называется **интегралом** от функции $f(x)$ на отрезке от a до b и обозначается через $\int_a^b f(x)dx$. Таким образом,

$$\int_a^b f(x)dx =$$
$$= \lim [f(x_1)(x_1 - x_0) + \ldots + f(x_n)(x_n - x_{n-1})],$$

где предел lim берется при условии, что число промежутков неограниченно увеличивается, а их длины стремятся к нулю.

В самом обозначении $\int_a^b f(x)dx$ сохраняются воспоминания об интегральной сумме, из которой получается интеграл. В Италии букву s часто пишут в виде $\int$. Поэтому сам знак интеграла есть просто первая буква латинского слова summa (сумма). Вслед за знаком $\int$ указывается, что суммировались выражения вида $f(x_k)(x_k - x_{k-1})$. Только вместо разности $x_k - x_{k-1}$ пишут dx, где d — первая буква латинского слова differentia (разность). Понятие интеграла является одним из основных в высшей математике. Пользуясь этим понятием, можно записать многие полученные ранее формулы гораздо короче и не приближенно, а точно. Например, формула объема любого тела принимает вид

$$V = \int_0^H S(h)dh, \qquad (1)$$

где H — высота этого тела, а $S(h)$ — площадь сечения, проведенного параллельно основанию тела на высоте h от основания (рис. 8).

Формулу площади фигуры, изображенной на рис. 11, можно записать в виде

$$S = \int_a^b f(x)dx, \qquad (2)$$

где $f(x)$ — высота кривой CD в точке с абсциссой x.

Путь, пройденный за промежуток времени от 0 до T, выражается через скорость $v(t)$ по формуле

$$s = \int_0^T v(t)dt, \qquad (3)$$

а работа определяется формулой

$$A = \int_0^L F(l)dl, \qquad (4)$$

где L — длина пути, а $F(l)$ — значение силы, производящей работу на расстоянии l от начала пути.

ГЕОМЕТРИЧЕСКОЕ ВЫЧИСЛЕНИЕ ИНТЕГРАЛОВ

Формулы (1) и (2) можно использовать для нахождения площадей и объемов различных тел. Но так как площади и объемы простых

тел мы уже знаем, то, наоборот, с помощью этих формул можно вычислить значения некоторых простых интегралов (дальше, на стр. 167, мы укажем, как можно сосчитать эти интегралы непосредственным вычислением, не прибегая к геометрии).

Самой простой геометрической формулой вычисления площади является формула площади прямоугольника: $S = hb$. Прямоугольник можно рассматривать как криволинейную трапецию, высота которой во всех точках одинакова

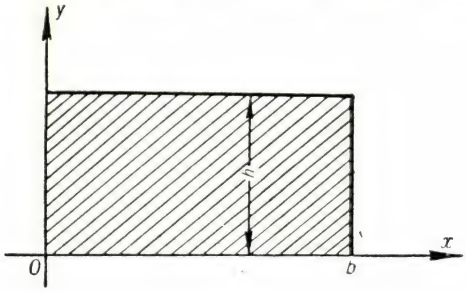


Рис. 12.

и равна h (рис. 12), так что его площадь может быть записана в виде интеграла $S = \int_0^b h dx$, где h — постоянная величина. Итак, мы доказали формулу

$$\int_0^b h dx = hb \quad (h\text{—постоянная}).$$

В частности, при $h=1$ получаем:

$$\int_0^b dx = b. \qquad (5)$$

Вспомним теперь формулу площади прямоугольного треугольника $S = \frac{1}{2} hb$, где h и b — катеты. Из рис. 13 видно, что треугольник можно рассматривать как криволинейную трапецию, высота y которой в точке с абсциссой x равна $\frac{hx}{b}$ (это вытекает из подобия треугольников OAB и OCD). Поэтому площадь треугольника может быть записана в виде интеграла $S = \int_0^b \frac{hx}{b} dx$.

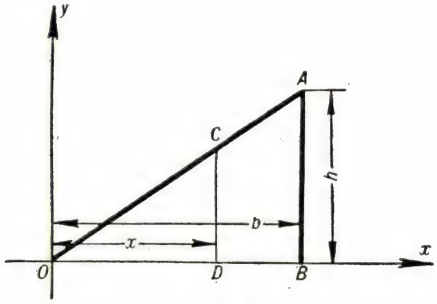


Рис. 13.

Таким образом мы доказали, что

$$\int_0^b \frac{hx}{b} dx = \frac{1}{2} hb.$$

В частности, если треугольник OAB равнобедренный, т. е. если $h = b$, то мы получаем формулу

$$\int_0^b x dx = \frac{1}{2} b^2. \qquad (6)$$

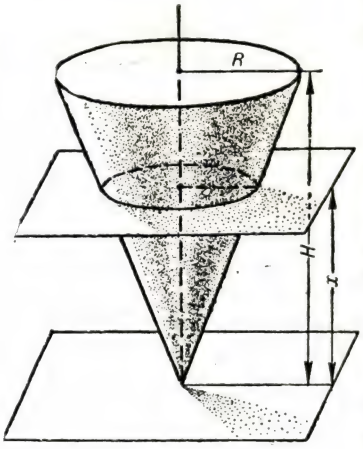


Рис. 14.

Наконец, рассмотрим еще один пример. Возьмем конус с высотой H и радиусом основания R. Поставим этот конус на вершину (так, чтобы его ось была вертикальной) и проведем плоскость параллельно основанию конуса на расстоянии x от вершины. Она пересечет конус по кругу, радиус которого равен $\frac{Rx}{H}$ (рис. 14). Площадь $S(x)$ этого сечения равна $\pi\left(\frac{Rx}{H}\right)^2 = \frac{\pi R^2}{H^2} x^2$. Поэтому по формуле (1) объем V конуса выражается интегралом вида

$$V = \int_0^H \frac{\pi R^2}{H^2} x^2 dx.$$

Сравнивая эту формулу с известной из школьного курса формулой объема конуса $V = \frac{1}{3}\pi R^2 H$, мы получаем, что

$$\int_0^H \frac{\pi R^2}{H^2} x^2 dx = \frac{1}{3}\pi R^2 H.$$

Эта формула верна при любых положительных значениях

R и H. В частности, при $R=\frac{1}{\sqrt{\pi}}b$, $H=b$ (и, следовательно, $\frac{\pi R^2}{H^2}=1$, $\pi R^2 H=b^3$) получаем:

$$\int_0^b x^2 dx=\frac{1}{3}b^3. \qquad (7)$$

Найденные выше формулы (5), (6), (7), очевидно, можно объединить в одну общую формулу

$$\int_0^b x^n\,dx=\frac{b^{n+1}}{n+1} \qquad (8)$$

при $n=0$, 1, 2. Эта формула, как доказывается в высшей математике, справедлива не только при $n=0$, 1, 2, но и при любых положительных значениях показателя n. Например,

$$\int_0^b x^{10}\,dx=\frac{b^{11}}{11};\quad \int_0^b \sqrt{x}\,dx=\int_0^b x^{\frac{1}{2}}dx=\frac{2}{3}b^{\frac{3}{2}}$$

ИНТЕГРИРОВАНИЕ МНОГОЧЛЕНОВ

Теперь уже нетрудно научиться интегрировать любой многочлен. Сделаем предварительно два простых, но очень важных замечания.

Пусть два тела M_1 и M_2 движутся в одном и том же направлении, причем так, что скорость тела M_2 в каждый момент времени в k раз больше скорости тела M_1. Тогда ясно, что и путь, пройденный телом M_2, будет в k раз больше пути, пройденного за то же время телом M_1. Запишем этот очевидный факт формулой. Обозначим скорость тела M_1 в момент t через $v(t)$, тогда скорость тела M_2 в тот же момент равна $k\cdot v(t)$. Пути s_1 и s_2, пройденные телами M_1 и M_2 за промежуток времени от $t=0$ до $t=T$, равны

$$s_1=\int_0^T v(t)dt,\quad s_2=\int_0^T kv(t)dt.$$

Но так как путь, пройденный вторым телом, в k раз больше пути, пройденного первым телом (т. е. $s_2=ks_1$), то

$$\int_0^T k\cdot v(t)dt=k\cdot\int_0^T v(t)\,dt.$$

Иначе говоря, **числовой (постоянный) множитель можно выносить из-под знака интеграла.**

Второе замечание. Пусть тело M_1 движется в некотором направлении, а по его поверхности движется в том же направлении тело M_2. Например, баржа плывет по реке, а по ее палубе идет человек. Обозначим скорость движения тела M_1 через $v_1(t)$, а скорость перемещения тела M_2 по поверхности тела M_1 — через $v_2(t)$. Тогда путь, пройденный телом M_1 за время от $t=0$ до $t=T$, равен

$$\int_0^T v_1(t)dt,$$

а путь, пройденный телом M_2 по поверхности тела M_1, равен

$$\int_0^T v_2(t)dt.$$

Общий же путь, пройденный в пространстве телом M_2 (как за счет собственного движения, так и за счет движения тела M_1, которое его «везет»), равен

$$\int_0^T v_1(t)dt+\int_0^T v_2(t)dt.$$

Но ясно, что скорость перемещения тела M_2 в пространстве равна $v_1(t)+v_2(t)$, так что путь, пройденный этим телом, имеет значение

$$\int_0^T [v_1(t)+v_2(t)]dt.$$

Приравнивая оба найденных значения пути, получим:

$$\int_0^T [v_1(t)+v_2(t)]\,dt=\int_0^T v_1(t)dt+\int_0^T v_2(t)\,dt,$$

т. е. **интеграл от суммы двух (или нескольких) функций равен сумме интегралов от слагаемых.**

Переходим к интегрированию многочленов. Пусть, например, нужно вычислить интеграл

$$\int_0^b (x^2-3x+5)dx.$$

Так как подынтегральное выражение есть сумма $x^2+(-3x)+5$, то можно наш интеграл разбить на три:

$$\int_0^b x^2dx + \int_0^b (-3x)dx + \int_0^b 5dx.$$

Во втором и третьем интегралах можно вынести за знак интеграла числовой множитель, после чего мы легко получим ответ:

$$\int_0^b (x^2 - 3x + 5)dx = \int_0^b x^2dx - 3\int_0^b xdx + 5\int_0^b dx =$$
$$= \frac{b^3}{3} - 3\frac{b^2}{2} + 5b.$$

Иначе говоря, интегрировать многочлены можно почленно.

Вообще если

$$f(x) = a_0x^n + a_1x^{n-1} + \ldots + a_{n-1}x + a_n \text{ —}$$

некоторый многочлен n-й степени, то его интеграл находится по формуле

$$\int_0^b f(x)dx = a_0\frac{b^{n+1}}{n+1} + a_1\frac{b^n}{n} + \ldots + a_{n-1}\frac{b^2}{2} + a_nb.$$

ПРИМЕНЕНИЯ ИНТЕГРАЛОВ

Мы научились вычислять интегралы от многочленов. Этого уже достаточно, чтобы иметь возможность решать многие математические и физические задачи. Покажем для начала, как просто получаются с помощью интегралов некоторые формулы, изучаемые в школе.

Выведем формулу пути равноускоренного движения. Если начальная скорость тела в момент $t=0$ равна v_0, а ускорение движения равно a, то в момент времени t скорость тела составит $v(t)=v_0+at$. Поэтому по формуле (3) путь, пройденный телом с начала движения до момента T, выражается формулой

$$s = \int_0^T v(t)dt = \int_0^T (v_0 + at)dt = v_0T + \frac{aT^2}{2}.$$

Очень просто с помощью интегралов подсчитать и работу, затрачиваемую для растяжения пружины. По закону Гука, сила натяжения $F(x)$ пружины, удлинившейся на величину x, равна kx, где k — постоянное число, называемое жесткостью пружины. Поэтому работа, необходимая для того, чтобы удлинить пружину на b сантиметров, равна

$$A = \int_0^b kx\,dx = k\frac{b^2}{2}$$

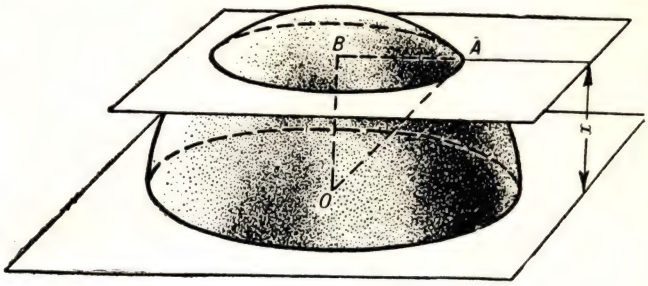


Рис. 15.

Затраченная работа равна потенциальной энергии растянутой пружины. Поэтому полученную формулу можно рассматривать и как формулу для потенциальной энергии растянутой пружины.

Выведем теперь некоторые геометрические формулы. Сначала найдем, чему равен объем шара радиуса R. Конечно, нам достаточно найти объем полушара, а потом его удвоить. Рассечем полушар плоскостью, параллельной его основанию и отстоящей на x от основания (рис. 15). В сечении получится круг радиуса $AB = \sqrt{R^2 - x^2}$ (это получается, если применить теорему Пифагора к треугольнику OAB). Поэтому площадь получившегося сечения равна

$$\pi\left(\sqrt{R^2 - x^2}\right)^2 = \pi R^2 - \pi x^2.$$

Но тогда объем полушара (высота его равна R) выражается формулой

$$V_{\text{полушара}} = \int_0^R (\pi R^2 - \pi x^2)dx = \pi R^2 R -$$
$$- \pi\frac{R^3}{3} = \frac{2}{3}\pi R^3.$$

Следовательно, объем всего шара равен $\frac{4}{3}\pi R^3$.

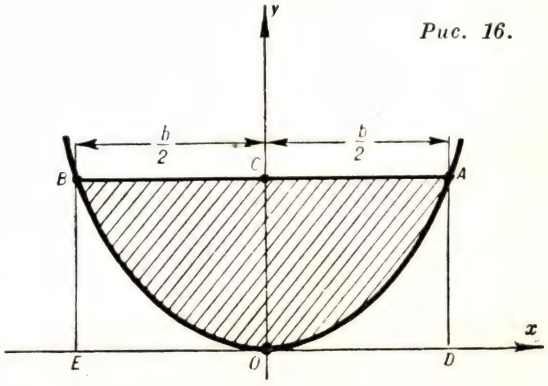


Рис. 16.

Но с помощью интегрального исчисления можно найти и такие площади и объемы, которые не изучаются в школе. Найдем, например, площадь параболического сегмента $AOBA$, у которого хорда AB равна b, а стрелка OC равна h (рис. 16). Уравнение параболы имеет вид $y = ax^2$. В точке с абсциссой $x = \frac{b}{2}$ ордината AD должна равняться длине стрелки h. Поэтому $h = \frac{ab^2}{4}$. Но это значит, что $a = \frac{4h}{b^2}$. Итак, наш параболический сегмент ограничен снизу параболой, у которой в точке с абсциссой x ордината $y = \frac{4hx^2}{b^2}$. Мы легко можем теперь найти площадь кривого треугольника OAD. По формуле (2), она равна

$$S = \int_0^{\frac{b}{2}} \frac{4hx^2}{b^2} dx = \frac{4h}{3b^2}\left(\frac{b}{2}\right)^3 = \frac{hb}{6}$$

Площадь же прямоугольника $ABED$ равна bh. Но площадь параболического сегмента получается, если из площади прямоугольника вычесть удвоенную площадь треугольника OAD, т. е. она равна $\frac{2bh}{3}$.

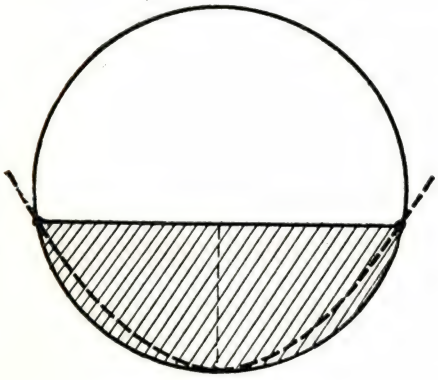


Рис. 17.

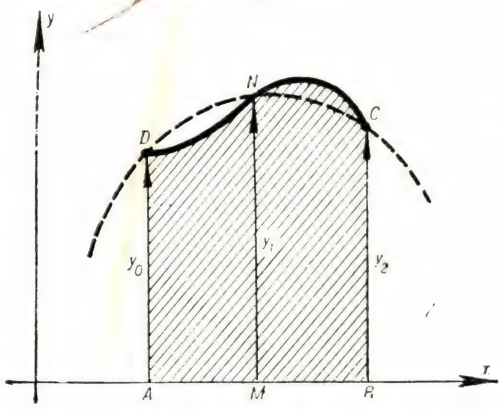


Рис. 18.

Круговой сегмент, имеющий небольшой центральный угол, можно приближенно заменить параболическим сегментом с той же хордой и той же стрелкой (рис. 17). Поэтому для площади кругового сегмента имеет место приближенная формула

$$S_{\text{круг. сегм.}} \approx \frac{2}{3} bh.$$

Например, если центральный угол равен 60°, то приближенная формула дает результат 0,0893... R^2, а точная 0,0906... R^2. Таким образом, даже для такого сравнительно большого центрального угла, как 60°, приведенная формула дает точность до 1,5%.

ЧУДЕСНАЯ ФОРМУЛА

Тот же прием, который мы применили для приближенного вычисления площади кругового сегмента, можно, конечно, применить и для случая произвольной криволинейной трапеции, ограниченной сверху кривой CD с уравнением $y=f(x)$ (рис. 18). Обозначим через M середину отрезка AB и восставим в точках A, M и B ординаты AD, MN, BC кривой CD. Длины этих ординат обозначим через y_0, y_1, y_2. Проведем через точки C, N и D дугу параболы (такую дугу можно провести всегда, и притом только одну; иногда она превращается в отрезок прямой).

Довольно простые подсчеты, использующие формулы (5), (6), (7), показывают, что площадь, лежащая под этой дугой параболы, равна $\frac{b-a}{6}(y_0 + 4y_1 + y_2)$, где b и a — абсциссы точек B и A. Без большой ошибки можно принять, что этому же равна и площадь криволинейной трапеции $ABCD$, т. е. что

$$S_{ABCD} \approx \frac{b-a}{6}(y_0 + 4y_1 + y_2).$$

Поскольку площадь криволинейной трапеции выражается интегралом $\int_a^b f(x)\,dx$, то найденная формула дает приближенное значение этого интеграла. Иными словами,

$$\int_a^b f(x)dx \approx \frac{b-a}{6}(y_0 + 4y_1 + y_2),$$

где y_0, y_1, y_2 — значения функции $f(x)$ в точках с абсциссами a, $\frac{a+b}{2}$ и b.

Объем любого тела можно приближенно считать по такой же формуле:

$$v = \int_0^H S(x)\,dx \approx \frac{H}{6}(S_0 + 4S_1 + S_2),$$

где H — высота тела, S_0 — площадь нижнего сечения, S_2 — площадь верхнего сечения, S_1 — площадь среднего сечения. К этой формуле прибегают для приближенного вычисления объема дерева, стога, бочки и других фигур более или менее сложной формы. Замечательно, что для всех фигур, изучаемых в школе (призмы, цилиндра, пирамиды, конуса, усеченной пирамиды, усеченного конуса, шара, шарового слоя, шарового сегмента), эта формула дает не приближенный, а совершенно точный результат. Предлагаем нашим читателям проверить это утверждение.

КАК ИЗМЕРИТЬ СКОРОСТЬ ПОЛЕТА ПУЛИ

Мы часто говорили выше о скорости движения (например, автомобилия). Так, мы имели формулу

$$s = \int_0^T v(t)\,dt,$$

в которой $v(t)$ означает скорость движения тела в *момент времени* t. Такую скорость в физике называют мгновенной скоростью. Каким же образом можно измерить мгновенную скорость движения? Если речь идет о скорости движения автомобиля, в кабине которого мы едем, то все обстоит очень просто — надо лишь посмотреть на стрелку спидометра, и мы будем знать скорость движения. Но как узнать скорость движения автомобиля, проезжающего мимо нас по улице, или скорость полета пули? Мы знаем, что существуют приборы для измерения расстояний (линейки, рулетки и др.) — приложим такой прибор к измеряемому расстоянию, и ответ сразу виден. Есть приборы и для измерения времени (часы, хронометры). Много есть и других полезных приборов. Но «скоростемеров» — приборов, которые можно было бы «приложить» к движущемуся мимо нас телу, чтобы непосредственно по его показанию узнать скорость движения тела, нет. Да и как «приложить» прибор к мчащемуся мимо автомобилю или летящей пуле?!

До некоторой степени нам могут помочь приборы, измеряющие расстояние и время. Эти приборы позволяют измерить путь, который пролетела пуля, и время, которое она на это затратила. Разделив путь на время, мы и узнаем скорость полета пули. Однако таким образом мы получаем лишь среднюю скорость полета пули, которая мало о чем говорит: ведь сопротивление воздуха постепенно замедляло движение пули, и потому в конце

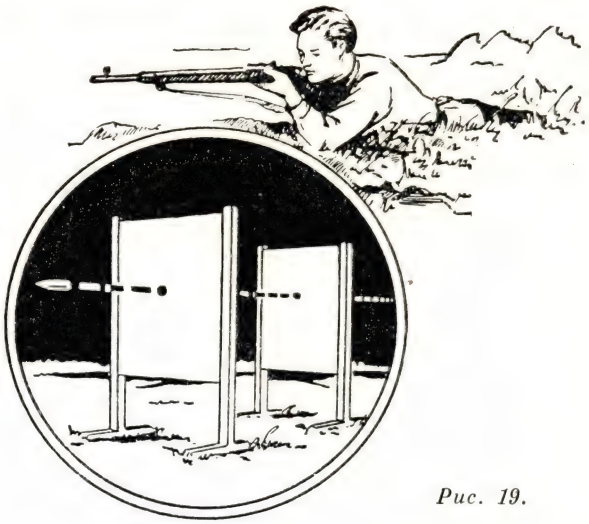


Рис. 19.

пути она летела с меньшей скоростью, чем в его начале. Поэтому для определения скорости пули в некоторой точке ее пути поступают иначе. В этой точке ставят лист тонкого материала, соединенный с часами таким образом, что они отмечают момент времени t_1, когда пуля пробивает этот лист. На небольшом расстоянии от него ставят второй лист, также соединенный с часами, так что они отмечают момент t_2, когда пуля его пробивает. Пусть первый лист находится на расстоянии s_1 от линии огня, а второй лист — на расстоянии s_2 (рис. 19). Тогда расстояние $s_2 - s_1$ пуля пролетает за время $t_2 - t_1$. Значит, средняя скорость полета пули за это время равна

$$v_{\text{ср.}} = \frac{s_2 - s_1}{t_2 - t_1}.$$

Но и это измерение не дает точного значения мгновенной скорости в момент t_1. Ведь воздух тормозил пулю, когда она летела между листами, и ко второму листу пуля подлетела с неколько меньшей скоростью, чем к первому. Чтобы уменьшить влияние сопротивления воздуха на скорость пули, надо ставить листы ближе друг к другу. И чем ближе будет второй лист к первому, тем точнее измерим мы мгновенную скорость полета пули в момент t_1 (мы считаем, конечно, что у нас совершенно точные часы и безукоризненные линейки). При этом чем ближе друг к другу расположены листы, тем за меньший промежуток времени $t_2 - t_1$ пролетает пуля расстояние между ними. Мы можем сказать, таким образом, что мгновенная скорость полета пули равна

$$v(t_1) = \lim \frac{s_2 - s_1}{t_2 - t_1},$$

где предел берется при условии, что значение s_2 приближается к значению s_1 (или, что то же самое, при условии, что значение t_2 приближается к значению t_1).

СКОРОСТЬ РАДИОАКТИВНОГО РАСПАДА

Различные радиоактивные вещества распадаются не одинаково быстро.

В каком же смысле можно говорить о том, что распад происходит «быстро» или «медленно»? Как можно измерить «скорость распада» куска радиоактивного вещества в данный момент времени? Легко измерить среднюю скорость распада за 1 год: надо измерить количество вещества, распавшегося за 1 год, и разделить его на число секунд в году. Это и даст среднюю скорость распада, выраженную в *г/сек*. Однако для нахождения мгновенной скорости распада этот расчет мало пригоден — ведь в течение года количество радиоактивного вещества постепенно уменьшалось, поэтому оно распадалось все медленнее и медленнее. Чтобы поточнее определить скорость распада в данный момент времени, надо измерить среднюю скорость распада не за год, а за месяц или еще лучше за сутки, час, минуту и т. д. Каждый раз надо брать количество вещества, распавшегося за это время, и делить на число секунд в выбранном промежутке времени. Так, уменьшая все время промежутки времени между двумя измерениями массы вещества, мы будем приближаться к какому-то числу. Это число и даст нам скорость распада в данный момент времени.

Формулами это можно записать следующим образом. Предположим, что в момент времени t_1 масса еще не распавшегося радиоактивного вещества в пробирке была равна m_1, а через некоторое время, в момент t_2, масса его уменьшилась (так как часть вещества превратилась в продукт распада) и стала равной m_2. Таким образом, за время t_2-t_1 масса имевшегося в пробирке радиоактивного вещества изменилась на m_2-m_1 граммов (это число отрицательное — ведь масса нераспавшегося радиоактивного вещества с течением времени уменьшается). Отношение

$$\frac{m_2-m_1}{t_2-t_1}$$

представляет собой среднюю скорость изменения массы радиоактивного вещества в пробирке за рассматриваемый промежуток времени, т. е. представляет собой среднюю скорость распада.

Чем меньше промежуток времени t_2-t_1 тем точнее это отношение выражает мгновенную скорость распада. Мы можем сказать, таким образом, что *мгновенная скорость распада* $u(t_1)$ в момент t_1 равна

$$u(t_1)=\lim\frac{m_2-m_1}{t_2-t_1},$$

где предел берется при условии, что значение t_2 приближается к t_1.

Совершенно аналогично можно определить мгновенную скорость химической реакции.

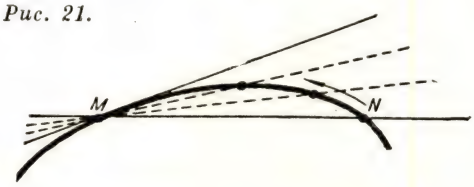
УМЕЕТЕ ЛИ ВЫ ПРОВОДИТЬ КАСАТЕЛЬНУЮ

Услышав такой вопрос, вы, вероятно, вспомните изучавшееся в седьмом классе построение касательной к окружности и дадите утвердительный ответ. Но речь идет о касательной к любой кривой, а не только к окружности. А в школьных учебниках не только ничего не сказано о проведении касательной к любой кривой, но даже не определяется, что это такое. Нельзя, разумеется, определять касательную как прямую, имеющую с кривой лишь одну общую точку: ось параболы пересекается с ней только в одной точке (рис. 20), но вряд ли кому-нибудь придет в голову говорить, что эта ось касается параболы.

Рис. 20.

Что же такое касательная к кривой и как ее провести? Постараемся ответить на эти вопросы. Проведем через точку M, лежащую на кривой, секущую MN (рис. 21). Если теперь

Рис. 21.



точку N приближать по кривой к точке M, то секущая будет поворачиваться вокруг точки M, все более приближаясь к некоторой прямой. Эта прямая и есть касательная к кривой в точке M. Для окружности это определение касательной

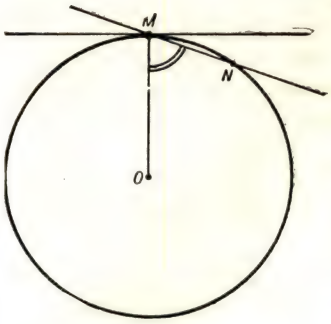


Рис. 22.

совпадает с обычным (рис. 22): по мере приближения точки N к точке M угол OMN приближается к прямому углу, и потому касательная к окружности перпендикулярна радиусу.

Итак, *касательная — это прямая, к которой приближается секущая MN, когда точка N приближается (по рассматриваемой кривой) к точке M.*

Теперь нам нетрудно будет описать положение касательной с помощью некоторой формулы. Для этого будем считать, что кривая AB является графиком некоторой функции $y = f(x)$. Обозначим ординаты точек M и N через y_1 и y_2, а их абсциссы — через x_1 и x_2. Рассматривая прямоугольный треугольник MNP с гипотенузой MN и катетами, параллельными осям

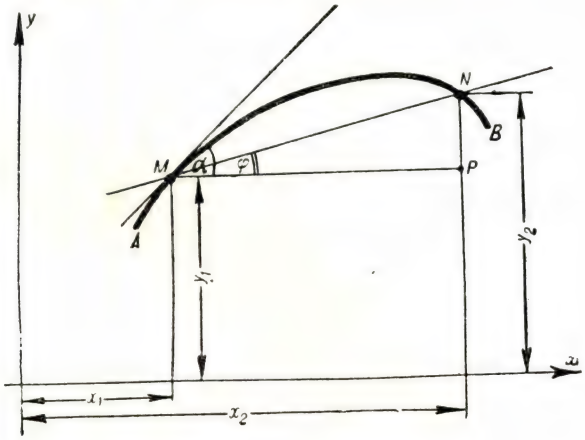


Рис. 23.

координат (рис. 23), мы можем легко определить угол, под которым секущая MN наклонена к оси x:

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{PN}{MP}.$$

Но из рис. 23 ясно, что $PN = y_2 - y_1$, $MP = x_2 - x_1$. Таким образом,

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{y_2 - y_1}{x_2 - x_1}.$$

Если теперь точка N начнет по кривой AB приближаться к точке M, то секущая MN будет, поворачиваясь, приближаться к положению касательной, так что в пределе мы получим тангенс угла α, под которым касательная наклонена к оси x:

$$\operatorname{tg} \alpha = \lim \frac{y_2 - y_1}{x_2 - x_1}.$$

Предел берется при условии, что точка N приближается к M, т. е. что значение x_2 приближается к x_1.

ПРОИЗВОДНАЯ

Мы рассмотрели несколько задач из физики и геометрии. Несмотря на внешнее различие этих задач, у них было много общего. В первых двух задачах (скорость движения, скорость распада) это общее заключалось в том, что мы в обоих случаях имели скорость изменения некоторой величины: скорость движения есть скорость изменения пути с течением времени, скорость распада есть скорость изменения массы радиоактивного вещества. Но и в третьем примере мы имели некоторую скорость изменения: тангенс угла наклона касательной есть скорость изменения ординаты, когда мы перемещаемся по оси x. Действительно, отношение $\frac{y_2 - y_1}{x_2 - x_1}$ представляет собой среднюю скорость возрастания ординаты при перемещении от точки x_1 к точке x_2, а предельное значение этого отношения (равное $\operatorname{tg}\alpha$) дает мгновенную скорость изменения ординаты.

Итак, во всех рассмотренных задачах мы имели мгновенную скорость изменения некоторой величины; этим и объясняется, что при определении этих на первый взгляд очень непохожих величин получились очень похожие формулы. Чисто математически скорость изменения можно определить следующим образом. Пусть мы имеем функцию $y = f(x)$. Обозначим те значения, которые эта функция принимает в двух точках x_1 и x_2 через y_1 и y_2. Тогда разность $y_2 - y_1$ показывает, насколько изменилось значение рассматриваемой функции при переходе от значения x_1 к значению x_2, а отношение $\frac{y_2 - y_1}{x_2 - x_1}$ представляет собой среднюю скорость изменения функции $y = f(x)$ на промежутке от x_1 до x_2. Если теперь уменьшать этот промежуток, приближая значение x_2 к x_1, то мы получим в пределе *мгновенную скорость изменения рассматриваемой функции в точке* x_1; она равна

$$\lim \frac{y_2 - y_1}{x_2 - x_1},$$

где предел берется при условии, что значение x_2 приближается к x_1. Эта мгновенная скорость

изменения называется **производной** от функции $y = f(x)$ по аргументу x в точке x_1; она обозначается через $f'(x_1)$.

В этих обозначениях явно указывается, в какой точке берется мгновенная скорость изменения (т. е. производная). Есть и другие обозначения для производной, но мы их не будем указывать. Конечно, производную можно находить в различных точках, так что производная $f'(x)$ есть опять некоторая функция от x. Теперь ясно, что рассмотренные выше задачи из физики и геометрии могут быть сформулированы с помощью производной.

Скорость движения $v(t)$ есть производная от пути $s(t)$ по времени:

$$v(t) = s'(t). \qquad (9)$$

Скорость $u(t)$ радиоактивного распада есть производная от массы радиоактивного вещества $m(t)$ по времени:

$$u(t) = m'(t). \qquad (10)$$

Наконец, тангенс наклона касательной к графику функции $y = f(x)$, проведенной в точке с абсциссой x, есть производная от функции $f(x)$:

$$\operatorname{tg} \alpha \,|_{\text{в точке } x} = f'(x). \qquad (11)$$

ПРОИЗВОДНЫЕ МНОГОЧЛЕНОВ

Из сказанного выше ясно, что уметь находить производные различных функций (нахождение производных называется дифференцированием) весьма важно для решения ряда задач физики, геометрии и других наук. Мы рассмотрим сейчас пример непосредственного вычисления производной.

Возьмем функцию $y = x^3$. Отношение, которое нужно рассмотреть при вычислении этой производной, имеет такой вид:

$$\frac{y_2 - y_1}{x_2 - x_1} = \frac{x_2^3 - x_1^3}{x_2 - x_1} = \frac{(x_2 - x_1)\,(x_2^2 + x_2x_1 + x_1^2)}{x_2 - x_1} = \\ = x_2^2 + x_2x_1 + x_1^2.$$

Если теперь x_2 будет приближаться к x_1, то последнее выражение будет, очевидно, приближаться к значению $x_1^2 + x_1^2 + x_1^2 = 3x_1^2$. Таким образом, производная от функции $y = x^3$ имеет в точке $x = x_1$ значение $3x_1^2$, т. е. $(x^3)' \,|_{\text{при } x = x_1} = 3x_1^2$. Более кратко это записывают так: $(x^3)' = 3x^2$.

Предоставляем читателю таким же образом найти производные от функций $y = x^2$ и $y = x$. Результаты получаются такие:

$$(x^2)' = 2x; \quad (x)' = 1.$$

Эти формулы вычисления производных объединяются, очевидно, одной общей формулой

$$(x^n)' = nx^{n-1}. \qquad (12)$$

Для случая целого положительного значения n эту формулу можно проверить примерно таким же способом, как мы выше вычислили производную от x^3. В высшей математике доказывается, что формула (12) верна при любом n. Заметим, что производная единицы (или вообще любой постоянной величины) равна нулю. Это легко следует из (12), да, впрочем, ясно и без этого, так как скорость изменения постоянной очевидно равна нулю.

Заметим теперь, что производная обладает следующими простыми, но важными свойствами: *постоянный множитель можно выносить за знак производной*; *кроме того, производная суммы двух (или нескольких) функций равна сумме производных от слагаемых*:

$$[kf(x)]' = k \cdot f'(x),$$
$$[f_1(x) + f_2(x)]' = f_1'(x) + f_2'(x).$$

Справедливость этих правил легко проиллюстрировать с помощью формулы (9) примерно так же, как мы сделали выше для интегралов.

Теперь уже легко можно находить производные любых многочленов. Например,

$$(3x^3 - 2x^2 + 5x - 4)' = (3x^3)' + (-2x^2)' + (5x)' + \\ + (-4)' = 3(x^3)' - 2(x^2)' + 5(x)' - 4(1)' = \\ = 3 \cdot 3x^2 - 2 \cdot 2x + 5 \cdot 1 - 4 \cdot 0 = 9x^2 - 4x + 5.$$

Вообще, если $f(x) = a_0x^n + a_1x^{n-1} + \ldots + a_{n-1}x + a_n$ — многочлен n-й степени, то его производная вычисляется по формуле

$$f'(x) = na_0x^{n-1} + (n-1)\,a_1x^{n-2} + \ldots + a_{n-1}.$$

ПЧЕЛЫ-МАТЕМАТИКИ

Великий русский математик П. Л. Чебышев в своей работе «Черчение географических карт» писал, что особенную важность имеют те методы науки, которые позволяют решать задачу, общую для всей практической деятельности человека, *как располагать средствами своими для достижения по возможности большей выгоды*. Так, рабочий-металлист старается из имеющегося куска металла получить как

Рис. 24.

можно больше деталей; раскройщик на обувной фабрике старается из куска кожи выкроить как можно больше заготовок; технолог старается так расставить станки на заводе, чтобы обработка деталей заняла как можно меньше времени, и т. д.

Да и не только человеку приходится решать такие задачи. Пчелы бессознательно решают одну из таких задач — они стараются придать сотам такую форму, чтобы при заданном объеме на них шло как можно меньше воска. И хотя они не знают математики, но точно решают эту задачу (рис. 24).

Пчелам помогает решать эту задачу инстинкт. Человек же отличается от пчел тем, что он действует не по инстинкту, а по разуму. Маркс говорил, что «самый плохой архитектор от наилучшей пчелы с самого начала отличается тем, что, прежде чем строить ячейку из воска, он уже построил ее в своей голове».

И большую помощь в решении таких задач оказывает человеку математика, в особенности понятие производной. Чтобы понять, как же математики решают такие задачи, рассмотрим одну из них.

КАК СДЕЛАТЬ САМУЮ БОЛЬШУЮ КОРОБКУ

Пусть перед нами квадратный кусок картона со стороной a. Из него нам надо сделать коробку без крышки. Вырежем по углам куска квадратики (рис. 25) и согнем по линиям, отмеченным пунктиром. У нас получилась коробка (рис. 26), но много ли в нее можно положить? А это зависит от того, какие квадратики мы вырезали из этой коробки. Если они были очень маленькие, то коробка получится низкая (рис. 27, *а*) и в нее много не положишь. А если они будут слишком большие (рис. 27, *б*), то коробка получится слишком узкая и в нее тоже войдет довольно мало. Найдем, при какой стороне x вырезанного квадратика объем $V(x)$ сделанной коробки будет наибольшим. Из рис. 26 видно, что $V = x(a-2x)^2 = 4x^3 - 4ax^2 + a^2x$. График этой функции имеет такой вид (рис. 28). При этом x должно лежать между 0 и $\frac{a}{2}$, так как вырезать из куска картона со стороной a четыре квадрата со стороной, большей чем $\frac{a}{2}$, нельзя. Из рис. 28 видно, что в той точке, где значение объема наибольшее, касательная идет горизонтально, т. е. образует с осью x угол, равный нулю. Но это значит, что в этой точке

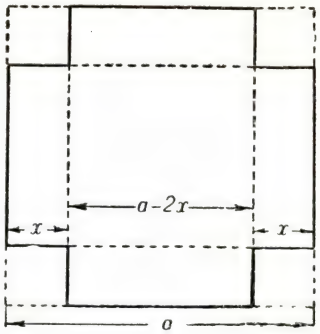


Рис. 25.

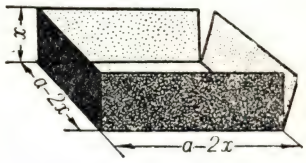


Рис. 26.

производная равна нулю. Таким образом, чтобы найти значение x_{max}, при котором объем коробки будет самым большим, надо найти все значения x, при которых производная функции $V(x) = 4x^3 - 4ax^2 + a^2x$ обращается в нуль; среди них обязательно будет и искомое значение x_{max}. По формуле дифференцирования многочлена находим:

$$V'(x) = 12x^2 - 8ax + a^2.$$

Приравниваем производную нулю и находим два корня $x_1 = \frac{a}{2}$, $x_2 = \frac{a}{6}$. Разумеется, корень $x_1 = \frac{a}{2}$ нас не устраивает: если мы вырежем квадраты со стороной $\frac{a}{2}$, то от листа картона ничего не останется. Значит, наибольшее зна-

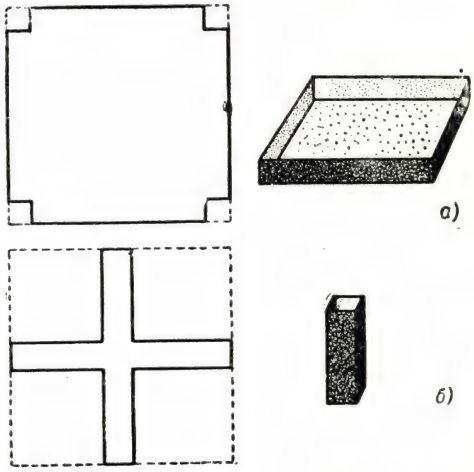


Рис. 27.

Рис. 28.

чение объема получится, если за x_{max} мы примем оставшееся значение $\frac{a}{6}$, т. е. квадраты со стороной $x = \frac{a}{6}$. Объем коробки тогда будет равен $\frac{2a^3}{27}$. Сделать из нашего куска картона коробку большего объема невозможно.

БАЛКА НАИБОЛЬШЕЙ ПРОЧНОСТИ

Основным элементом любой строительной конструкции является балка. Прочность балки зависит от того, какую форму имеет ее поперечное сечение. При этом высота сечения играет значительно большую роль, чем ее ширина (гораздо труднее согнуть линейку, поставленную на ребро, чем линейку, лежащую плашмя, рис. 29). Инженерные расчеты показывают,

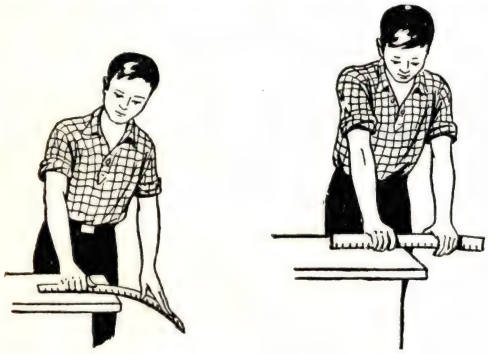


Рис. 29.

что прочность балки с прямоугольным сечением пропорциональна ширине балки a и квадрату ее высоты h. Иными словами, прочность такой балки (измеренная в некоторых единицах) равна kah^2, где k — коэффициент, зависящий от длины балки, материала, из которого она сделана, и т. д.

Деревянные балки приходится обычно вытесывать из круглых бревен. В связи с этим возникает задача, как из бревна, имеющего радиус R, сделать балку наибольшей прочности. На рис. 30 изображено поперечное сечение бревна. Разумеется, прочность вырезанной балки будет функцией от ширины этой балки. Но если взять ширину слишком большой (почти равной диаметру бревна), то получится балка очень маленькой высоты и прочность ее будет мала (рис. 31, *а*). Мала будет прочность балки и если сделать ее слишком узкой (рис. 31, *б*). Чтобы найти, при каком соотношении

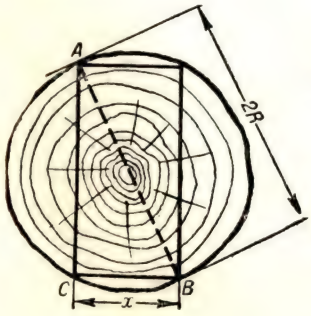


Рис. 30.

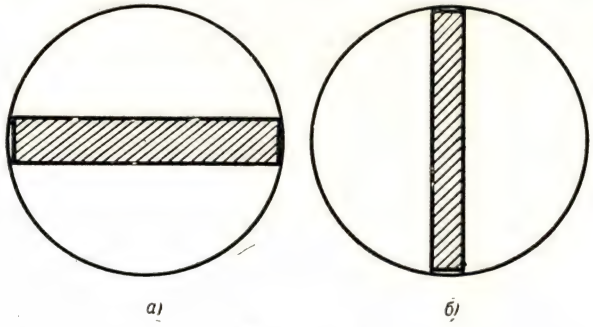


Рис. 31.

длины и ширины прочность будет наибольшей, выразим прочность балки как функцию от ее ширины x. Из треугольника ABC, изображенного на рис. 30, видно, что высота балки, имеющей ширину x, равна $\sqrt{4R^2 - x^2}$. Поэтому прочность такой балки равна

$$kx(4R^2 - x^2) = 4R^2kx - kx^3.$$

График функции $y = 4R^2kx - kx^3$ имеет такой вид (рис. 32), а ее производная равна $4R^2k - 3kx^2$ и обращается в нуль при $x_{1,2} = \pm\frac{2R\sqrt{3}}{3}$. Поскольку ширина балки должна быть положительной, то мы получаем, что самая прочная балка будет, если ширина ее равна $a = \frac{2R\sqrt{3}}{3}$; высота балки определится по формуле $h = \sqrt{4R^2 - a^2} = \frac{2R\sqrt{6}}{3}$

Отношение $\frac{h}{a}$ равно $\sqrt{2} \approx \frac{7}{5}$.

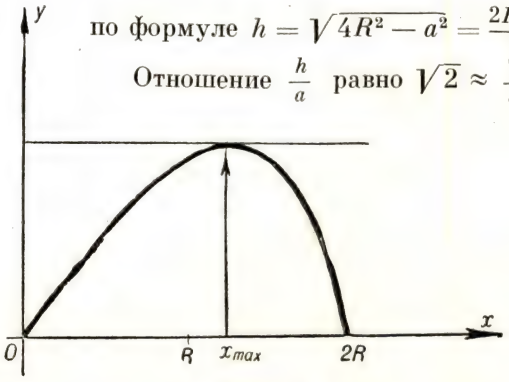


Рис. 32.

Именно такое отношение высоты балки к ширине и предписано правилами производства строительных работ.

ФОРМУЛА НЬЮТОНА — ЛЕЙБНИЦА

Между дифференцированием и интегрированием имеется глубокая связь: формула (3) показывает, что путь находится по мгновенной скорости с помощью интегрирования, а формула (9) утверждает, что скорость находится по пути с помощью дифференцирования. Это наводит на мысль, что действия дифференцирования и интегрирования связаны друг с другом примерно так же, как действия сложения и вычитания, умножения и деления, возведения в степень и извлечения корня, т. е. что эти операции взаимно обратны. Так оно и есть на самом деле.

Например, пользуясь тем, что $v(t)=s'(t)$, можно записать формулу (3) в виде

$$s=\int_0^T s'(t)\,dt.$$

Здесь s — путь, пройденный телом начиная с момента $t=0$. Но может случиться и так, что пройденный путь отсчитывается не с момента $t=0$, а с какого-то более раннего момента (например, не с момента начала путешествия, а с момента выпуска автомобиля с завода). Тогда путь s придется записать в виде разности $s(T)-s(0)$ пути, пройденного к моменту $t=T$, и пути, пройденного к моменту $t=0$. Равенство (3) примет тогда такой вид:

$$s(T)-s(0)=\int_0^T s'(t)\,dt.$$

Таким же образом, для любых двух моментов времени $t=a$ и $t=b$ справедливо равенство

$$s(b)-s(a)=\int_a^b s'(t)\,dt.$$

Вообще, для любой функции $F(x)$ имеет место равенство

$$F(b)-F(a)=\int_a^b F'(x)\,dx.$$

Эта формула называется формулой Ньютона — Лейбница в честь знаменитых математиков Ньютона и Лейбница, почти одновременно установивших эту формулу в конце XVII в. (примерно через 70 лет после выхода в свет книги Кеплера «Стереометрия винных бочек»). Следует сказать, что в геометрической форме эту формулу высказал учитель Ньютона Барроу в 1670 г. Он указал, что вычисление площадей — действие, обратное проведению касательных.

Значение формулы Ньютона — Лейбница состоит в следующем: если мы знаем какую-нибудь функцию $F(x)$, производная которой равна $f(x)$, т. е. $F'(x)=f(x)$, то легко вычислить интеграл $\int_a^b f(x)dx$ — он равен разности значений функции $F(x)$ в точках b и a. Каждую функцию $F(x)$, для которой $F'(x)=f(x)$, называют *первообразной* для функции $f(x)$. Значит, если функция $F(x)$ — первообразная для функции $f(x)$, то $f(x)$ — производная для функции $F(x)$.

Таким образом, вычисление интегралов сводится, в основном, к нахождению первообразных. А нахождение первообразной есть задача, обратная дифференцированию. Поэтому чем большее число функций мы будем уметь дифференцировать, тем больше первообразных мы будем знать и тем больше интегралов сможем найти. Пока что мы умеем дифференцировать только многочлены. Этого уже достаточно, чтобы интегрировать любые многочлены (не прибегая к примененным выше геометрическим приемам).

Но во многих задачах встречаются функции, отличные от многочленов. Мы научимся сейчас дифференцировать показательную и тригонометрические функции.

ПРОИЗВОДНЫЕ СИНУСА И КОСИНУСА

Производные от тригонометрических функций проще всего вычислить, исходя из физических соображений. Рассмотрим точку A, движущуюся по окружности радиуса R со скоростью ωR. Будем считать, что при $t=0$ точка A находилась в положении A_0 (рис. 33). Через t секунд точка пройдет путь длины ωRt и окажется в положении A. Дуга A_0A имеет длину ωRt, т. е. содержит ωt радиан, значит, и угол AOA_0 равен ωt радиан. Поэтому координаты точки A равны $x=R\cos\omega t$ и $y=R\sin\omega t$ (это легко выводится из треугольника ABO). Иными словами, проекция B точки A на ось Ox движется по закону $x=R\cos\omega t$, а проекция C этой же точки на ось Oy движется по закону $y=R\sin\omega t$. Найдем скорости этих колебаний. Для этого разложим скорость движения точки A на две составляющие: горизонтальную и вертикальную. Вектор скорости точки A (имеющий длину ωR) направлен по касательной к окружности, проведенной в точке A, и потому образует с осью Ox угол $\omega t+\frac{\pi}{2}$, а с осью Oy — угол ωt (рис. 34). Следовательно,

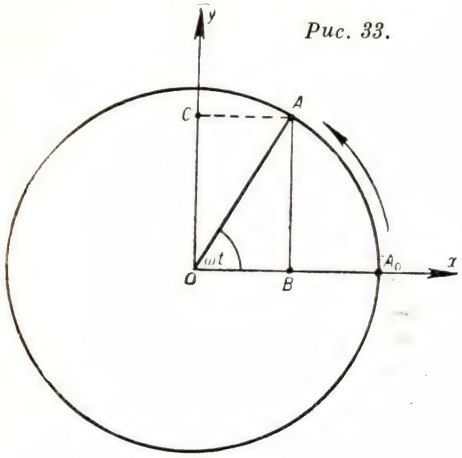


Рис. 33.

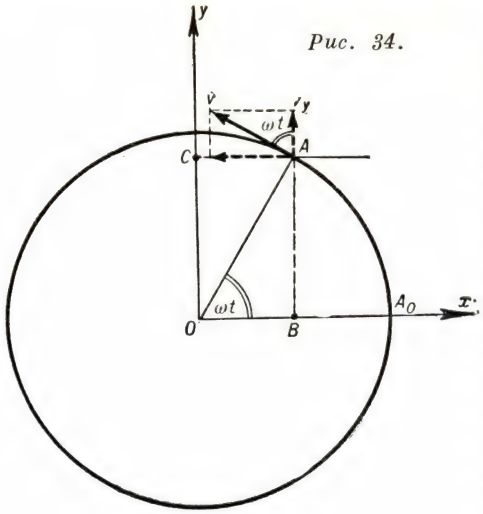


Рис. 34.

Чтобы сосчитать производную от функции $y=e^x$ в какой-либо точке x_0, сдвинем график этой функции на отрезок x_0. После сдвига в точке x ордината станет равной не e^x, а e^{x-x_0}, т. е. сдвинутая кривая является графиком функции $y=e^{x-x_0}$ (рис. 35). При сдвиге графика касательная, проведенная к кривой $y=e^x$ в точке $x=0$, перейдет в касательную, проведенную к сдвинутой кривой (т. е. кривой $y=e^{x-x_0}$) в точке $x=x_0$ (рис. 36).

его проекция на ось Ox (т. е. скорость движения точки B) равна

$$v_x = \omega R \cos\left(\omega t + \frac{\pi}{2}\right) = -\omega R \sin \omega t,$$

а его проекция на ось Oy (т. е. скорость движения точки C) равна

$$v_y = \omega R \cos \omega t.$$

Мы доказали тем самым, что скорость колебания, происходящего по закону $x=R\cos\omega t$, равна $v_x=-\omega R\sin\omega t$. Так как скорость является производной от пути по времени, то это означает, что

$$(R\cos\omega t)' = -\omega R \sin \omega t,$$

или, при $R=1$,

$$(\cos\omega t)' = -\omega \sin \omega t. \qquad (13)$$

Точно так же доказывается (из рассмотрения движения точки C), что

$$(\sin\omega t)' = \omega \cos \omega t. \qquad (14)$$

В частности, при $\omega=1$ мы получаем, что

$$(\cos t)' = -\sin t, \quad (\sin t)' = \cos t.$$

ПРОИЗВОДНАЯ ПОКАЗАТЕЛЬНОЙ ФУНКЦИИ

Теперь продифференцируем показательную функцию $y=e^x$. Мы уже знаем (см. статью «Функции в природе и технике»), что касательная к кривой $y=e^x$, проведенная в точке пересечения ее с осью ординат, наклонена к осям под углом в 45°. Вспоминая геометрический смысл производной (см. стр. 163), мы можем сказать, что производная функции $y=e^x$ в точке $x=0$ равна tg45°, т. е. 1. Итак, $(e^x)'|_{\text{при } x=0}=1$.

Таким образом, касательная к кривой $y=e^{x-x_0}$ в точке x_0 наклонена к оси x под углом 45°, т. е.

$$(e^{x-x_0})'\,|_{\text{при } x=x_0} = 1.$$

Теперь легко найти производную функции $y=e^x$ в точке $x=x_0$. В самом деле, так как по-

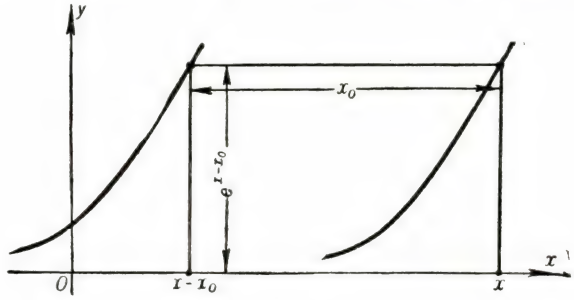


Рис. 35.

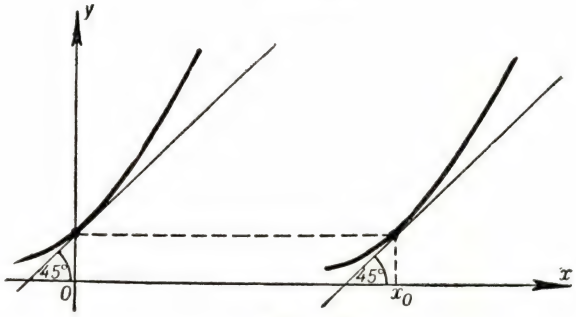


Рис. 36.

стоянный множитель e^{x_0} можно вынести за знак производной, то мы получим:

$$(e^x)'\,|_{\text{при } x=x_0} = (e^{x_0}e^{x-x_0})'\,|_{\text{при } x=x_0} = e^{x_0}(e^{x-x_0})'\,|_{\text{при } x=x_0} = e^{x_0}\cdot 1 = e^{x_0}.$$

Этим доказано, что производная от функции $y=e^x$ в точке $x=x_0$ равна e^{x_0}.

Так как x_0 — произвольная точка, то мы можем просто написать

$$(e^x)' = e^x.$$

Лишь немногим более сложные рассуждения показывают, что

$$(e^{cx})' = ce^{cx}. \qquad (15)$$

РАДИОАКТИВНЫЙ РАСПАД

Многие физические законы связывают между собой некоторую величину и скорость ее изменения. Рассмотрим, например, радиоактивный распад. Скорость распада тем больше, чем больше взято радиоактивного вещества. Это и понятно: если, скажем, в каждом грамме взятого радиоактивного вещества за 1 сек. распадается 0,0001 *г*, то в двух граммах этого вещества за 1 сек. распадается 0,0002 *г*, а в семи граммах распадается за 1 сек. 0,0007 *г*, и т. д. Иначе говоря, скорость распада (мы ее обозначали выше буквой u, см. формулу (10) прямо пропорциональна массе m имеющегося радиоактивного вещества:

$$u = -km. \qquad (16)$$

Здесь k — положительный коэффициент пропорциональности, а знак минус поставлен потому, что вещество распадается и его становится меньше, т. е. скорость распада отрицательная. (Этот закон, связывающий массу радиоактивного вещества и скорость распада, справедлив лишь в случае, если количество радиоактивного вещества не слишком велико и не происходит «цепной реакции»; подробнее об этом вы прочтете в статье «Строение атома и атомная энергия».)

На первый взгляд кажется, что из уравнения (16) ничего нельзя определить: ведь это одно уравнение с двумя неизвестными u и m (коэффициент пропорциональности k для каждого вида радиоактивного вещества определяется из опыта), а для нахождения двух неизвестных надо иметь два уравнения. Однако второе уравнение легко найти: ведь u — это скорость изменения массы m, а потому $u=m'$. Поэтому мы можем переписать закон радиоактивного распада (т. е. формулу (16) в виде

$$m' = -km. \qquad (17)$$

Мы получили одно уравнение для определения одной неизвестной m. Только это уравнение не такое, какие изучаются в школе: оно связывает величину m и ее скорость изменения производную). Уравнения, связывающие величины и их производные, называются дифференциальными уравнениями.

Легко проверить, что функция $m=Ce^{-kt}$, где C — любое число, является решением дифференциального уравнения (17) (т. е. если подставить в это уравнение вместо m эту функцию, то оно обратится в тождество). В самом деле,

$$m' = (Ce^{-kt})' = -Cke^{-kt} = -km.$$

Можно показать, что других функций (кроме $m(t)=Ce^{-kt}$), удовлетворяющих уравнению (17), *не существует*, т. е. что всякое решение уравнения (17) имеет вид $m(t)=Ce^{-kt}$. Это и есть закон уменьшения массы радиоактивного вещества с течением времени.

У нас остался невыясненным один вопрос: чему равна постоянная C? На этот вопрос нетрудно ответить. Из формулы $m(t)=Ce^{-kt}$ находим (полагая $t=0$), что масса радиоактивного вещества в начальный момент времени $t=0$ была равна $Ce^0=C$. Таким образом, C — это масса радиоактивного вещества в начальный момент времени; ее принято обозначать через m_0. Поэтому, заменяя C на m_0, получаем окончательный вид закона радиоактивного распада:

$$m(t) = m_0 e^{-kt}. \qquad (18)$$

Найдем теперь, через сколько лет количество радиоактивного вещества уменьшится вдвое. Для этого нужно определить число T_0 из уравнения $e^{-kT_0}=\frac{1}{2}$. После логарифмирования (по основанию e) находим, что $T_0 = \frac{1}{k}\ln 2 \approx \frac{0,69}{k}$ (через $\ln x$ мы обозначаем логарифм числа x по основанию e). Этот промежуток времени T_0 называют периодом полураспада данного радиоактивного вещества. Отметим, что этот промежуток времени не зависит от того, сколько было взято радиоактивного вещества, а зависит только от k, т. е. от того, какое взято вещество. Например, период полураспада радия равен 1590 годам, период полураспада урана-238 равен 4,5 млрд. лет, а период полураспада тория C составляет всего 0,0000003 сек.

С помощью числа T_0 закон радиоактивного распада можно записать так:

$$m(t) = m_0 (e^{-kT_0})^{\frac{t}{T_0}} = m_0 \left(\frac{1}{2}\right)^{\frac{t}{T_0}}.$$

В этой форме его обычно и используют в физике.

ПОКАЗАТЕЛЬНАЯ ФУНКЦИЯ В ПРИРОДЕ И ТЕХНИКЕ

Существует огромное количество процессов в природе, которые описываются такими же дифференциальными уравнениями, как уравнение (17) для радиоактивного распада. Общим для всех этих процессов является то, что скорость изменения рассматриваемой величины y прямо пропорциональна значению этой величины в данный момент времени, т. е.

$$y' = cy. \qquad (19)$$

Коэффициент пропорциональности c положителен или отрицателен в зависимости от того, увеличиваются или уменьшаются с течением времени значения величины y. Дифференциальное уравнение (19) имеет точно такой же вид, как и уравнение радиоактивного распада (только коэффициент пропорциональности здесь обозначается через c, а не через $-k$). Так как одинаковые уравнения имеют одинаковые решения, то для всех таких процессов значения y в любой момент времени t выражаются формулой

$$y(t) = y_0 e^{ct},$$

где y_0 — значение величины y при $t = 0$.

Теперь становится понятным, почему в природе и технике встречается так много величин, изменяющихся по показательному закону (ток самоиндукции, протекающий в катушке после выключения постоянного напряжения; изменение давления с высотой подъема и т. д., см. статью «Функции в природе и технике»). Все эти величины удовлетворяют дифференциальным уравнениям вида (19).

ЛЕВЕРЬЕ И АДАМС ОТКРЫВАЮТ НОВУЮ ПЛАНЕТУ

По второму закону Ньютона, сила равна произведению массы на ускорение:

$$F = ma.$$

Но ускорение тела, движущегося прямолинейно, представляет собой «скорость изменения скорости», т. е. является производной от скорости $a = v'$. Сама же скорость является производной от пройденного пути: $v = s'$. Таким образом, чтобы найти ускорение движущегося тела, надо дважды продифференцировать функцию $s(t)$. Поэтому ускорение называют второй производной от пути по времени. Обозначают это так:

$$a(t) = s''(t).$$

Пользуясь этим обозначением, мы можем записать второй закон Ньютона в следующем виде:

$$F = ms''.$$

Сила F зависит от многих обстоятельств: от времени, от скорости движения, от того, в какой точке пространства находится движущееся тело. Например, на парашютиста, спускающегося с раскрытым парашютом, действуют сила тяжести mg и сила сопротивления воздуха, которую можно считать пропорциональной скорости падения, т. е. равной $-kv$. Таким образом, общая сила, действующая на парашютиста, равна

$$F = mg - kv = mg - ks'.$$

Следовательно, движение парашютиста описывается дифференциальным уравнением

$$ms'' = mg - ks'.$$

Иной вид имеет уравнение движения ракеты, вертикально поднимающейся по инерции после полного сгорания горючего. Сила притяжения ракеты к Земле обратно пропорциональна квадрату расстояния ракеты от центра Земли, т. е.

$$F = -\frac{k}{s^2}$$

(мы считаем, что ракета вышла из земной атмосферы и потому на нее не действует сила сопротивления воздуха).

Таким образом, указанное движение ракеты описывается дифференциальным уравнением

$$ms'' = -\frac{k}{s^2},$$

где m — масса ракеты. (Этим уравнением описывается также вертикальное падение метеорита на Землю до вхождения его в атмосферу.)

Вообще, второй закон Ньютона позволяет описывать самые разнообразные движения тел с помощью дифференциальных уравнений. Можно написать дифференциальные уравнения для движения поршня паровой машины, корабля в море, планеты вокруг Солнца, искусственного спутника вокруг Земли.

Решая дифференциальные уравнения движения планет и их спутников (эти уравнения весьма сложны, так как планеты притягиваются не только к Солнцу, но и друг к другу), ученые предсказывают их будущее движение, узнают

моменты солнечных и лунных затмений. Когда однажды оказалось, что планета Уран отклоняется от заранее вычисленной орбиты, ученые нисколько не усомнились в «правильности» математики. Французский астроном Леверье и английский астроном Адамс одновременно и независимо один от другого сделали смелое предположение, что отклонение Урана вызывается притяжением новой, до тех пор неизвестной планеты. С помощью дифференциальных уравнений они высчитали положение этой новой планеты и указали, где нужно ее искать на небе. Точно в указанном месте эта новая планета (ее назвали Нептуном) была затем обнаружена.

УРАВНЕНИЕ ГАРМОНИЧЕСКИХ КОЛЕБАНИЙ

Во многих случаях тела совершают колебания около положения равновесия под действием силы, величина которой пропорциональна отклонению тела от положения равновесия и которая стремится возвратить это тело в положение равновесия. Например, это имеет место для груза, подвешенного на пружине. Иначе говоря,

Рис. 37.

сила, действующая на тело, выражается формулой

$$F = -ks,$$

где s — отклонение тела от положения равновесия, а k — жесткость пружины. Поэтому (в силу второго закона Ньютона) дифференциальное уравнение движения тела имеет такой вид:

$$ms'' = -ks.$$

Обозначив положительное число $\frac{k}{m}$ через ω^2, мы сможем записать это уравнение в виде

$$s'' = -\omega^2 s.$$

Это уравнение называется *уравнением гармонических колебаний*, так как функция

$$s = C_1 \cos \omega t + C_2 \sin \omega t \qquad (20)$$

при любых C_1 и C_2 является решением этого уравнения.

В самом деле, по формулам (13) и (14) скорость тела, движущегося по закону (20), равна

$$v = s' = -C_1 \omega \sin \omega t + C_2 \omega \cos \omega t;$$

продифференцировав еще раз, найдем ускорение:

$$s'' = -C_1\omega^2 \cos \omega t - C_2\omega^2 \sin \omega t = \\ = -\omega^2 (C_1 \cos \omega t + C_2 \sin \omega t).$$

Но выражение, стоящее в скобках, равно s. Таким образом, взятая функция s действительно удовлетворяет уравнению $s'' = -\omega^2 s$. Можно доказать, что всякое решение этого уравнения имеет такой вид.

Итак, сила, пропорциональная отклонению тела от положения равновесия и стремящаяся вернуть его в это положение, вызывает гармонические колебания частоты ω, где $\omega^2 = \frac{k}{m}$ (m — масса тела, k — коэффициент пропорциональности).

Для колебаний электрической цепи можно также записать аналогичный закон, только надо заменить массу тела самоиндукцией катушки, путь, пройденный телом, — напряжением на конденсаторе, а скорость тела — силой тока и т. д. (рис. 37). Поскольку законы, управляющие этими явлениями, совершенно аналогичны, то и колебания, возникающие в обоих случаях, записываются одними и теми же формулами. А затухающие колебания возникают, если, кроме силы, стремящейся вернуть тело в положение равновесия, действует еще сопротивление среды, пропорциональное скорости движения тела (или сопротивление электрической цепи).

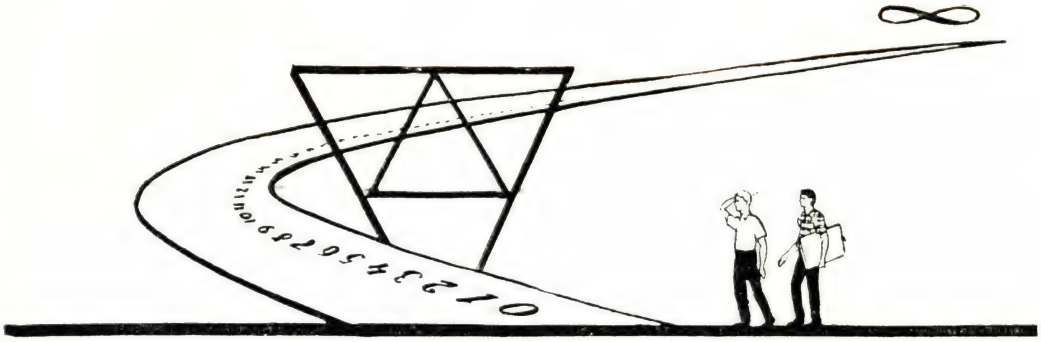
МОДЕЛИРОВАНИЕ

Тот факт, что самые различные явления описываются одинаковыми дифференциальными уравнениями, часто используется на практике. Он позволяет изучать одни явления, наблюдая другие, если только оба явления описываются одинаковыми уравнениями. Пусть, например, надо выяснить, как будет двигаться под землей нефть в районе буровых скважин. Наблюдать движение нефти под землей было бы очень затруднительно.

Но движения жидкости описываются теми же самыми дифференциальными уравнениями, что и движения электричества. Поэтому собирают электрическую цепь, в которой движения электричества происходят так же, как изучаемые движения нефти.

Измеряя напряжение и силу тока в разных точках собранной цепи, можно узнать, где выгоднее всего поставить буровую вышку, куда надо накачивать воду, чтобы усилить выход нефти, и т. д.

Такое изучение одних явлений при помощи других, описываемых теми же самыми уравнениями, называется моделированием явлений. К нему часто прибегают в самых различных вопросах техники.



Алгебра конечного и бесконечного

На первый взгляд может показаться сомнительным, чтобы алгебра, та самая, в которой, как знает каждый школьник, всё формулы да формулы и нет чертежей, оказалась геометрической.

И все же такая алгебра существует уже более ста лет. Она разрабатывается математиками для нужд физики и для нужд самой математики. Почти все начальные формулы геометрической алгебры по виду хорошо знакомы каждому школьнику, однако буквы, входящие в эти формулы, имеют непривычный смысл: они обозначают не числа, а «направленные отрезки», такие, которые используются в физике для изображения сил, скоростей, ускорений. Такие направленные отрезки математики называют векторами.

ГЕОМЕТРИЧЕСКАЯ АЛГЕБРА

В этой статье мы расскажем о некоторых основных понятиях и правилах этой алгебры (ее называют векторной алгеброй) и покажем, как она используется для решения разнообразных геометрических и физических задач, которые трудно решить, пользуясь только школьной геометрией.

ГЕОМЕТРИЯ ПОМОГАЕТ ФИЗИКЕ

Как изображают силы? Напомним, что сила, приложенная к некоторой точке P какого-либо твердого тела, изображается на чертеже направленным отрезком PA с заострением в точке A (рис. 1).

Направление этого отрезка, т. е. направление луча PP', на котором лежит

отрезок PA, совпадает с направлением изображаемой силы.

Длина отрезка PA выбирается так, чтобы в нем умещалось столько масштабных отрезков (например, отрезков длиной в 1 *см*), сколько заключается масштабных единичных сил (например, сил, равных 1 *кГ*) в изображаемой силе.

Направленный отрезок PA принято записывать так: $\overrightarrow{PA}$. Стрелка, поставленная сверху, должна напомнить, что нас интересует не только длина направленного отрезка (эту длину обозначают либо PA, либо AP — безразлично), но также и его направление. Направленный отрезок $\overrightarrow{PA}$ принято называть вектором. Точку P, т. е. точку приложения силы, называют началом вектора, точку A называют концом вектора.

Равнодействующая сила. Если к какой-либо точке P приложены две силы разного направления, то, как известно из физики, их совместное действие равносильно действию некоторой единой силы, также приложенной в точке P.

Величина этой равнодействующей силы вовсе не равна сумме величин двух исходных сил, а оказывается меньшей, чем их сумма.

Как же точно указать направление равнодействующей силы и ее величину?

В решении этого вопроса на помощь физике приходит геометрия.

Многочисленные физические опыты подтверждают правильность следующего закона, формулировка которого (на это следует обратить внимание) становится возможной только благодаря геометрическому способу изображения сил, о котором было сказано выше: *равнодействующая двух сил, изображаемых векторами $\overrightarrow{PA}$ и $\overrightarrow{PB}$, изображается вектором $\overrightarrow{PQ}$, являющимся диагональю параллелограмма, построенного на направленных отрезках $\overrightarrow{PA}$ и $\overrightarrow{PB}$* (рис. 2).

Таким образом, точное построение вектора, изображающего равнодействующую двух сил, является простой геометрической операцией.

Как назвать? Операцию, с помощью которой из заданных составляющих сил возникает их равнодействующая, называют композицией сил или сложением сил, а равнодействующую — суммой двух сил.

Не следует, однако, забывать, что сложение сил (или сложение векторов) производится совсем по другим правилам, чем сложение чисел. По этой причине его часто называют геометрическим сложением.

Как обозначить? Естественно, конечно, воспользоваться обозначениями, принятыми в арифметике и алгебре, и писать так:

$$PA + \overrightarrow{PB} = PQ, \quad (1)$$

не забывая, конечно, что знак «+» означает в этой

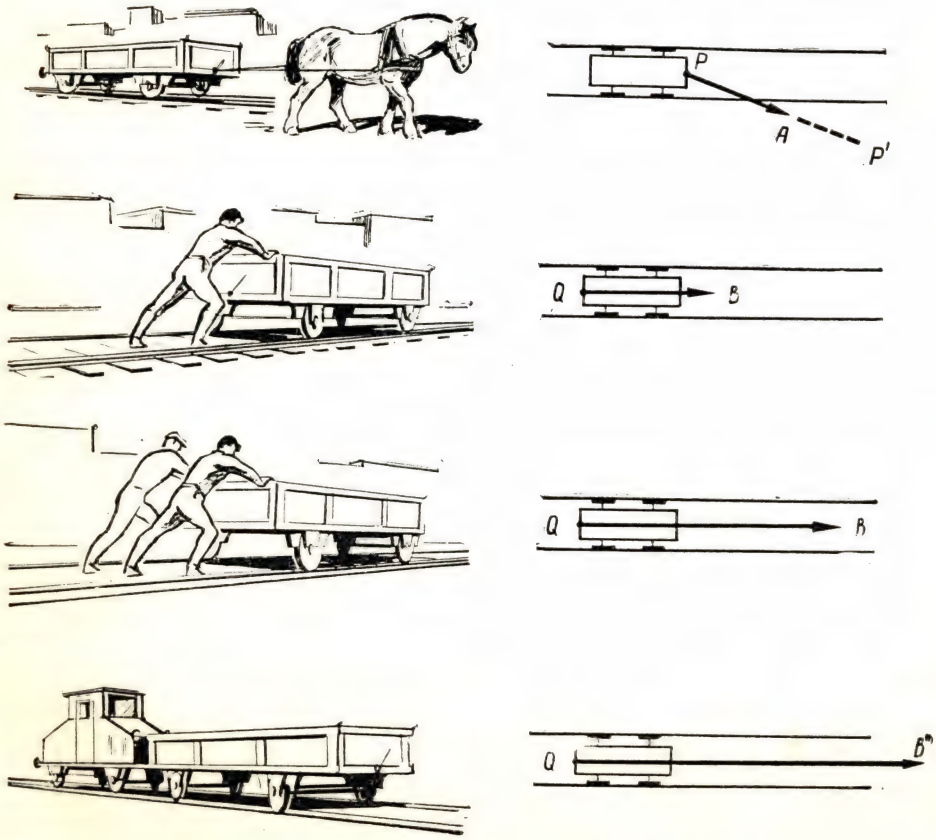


Рис. 1.

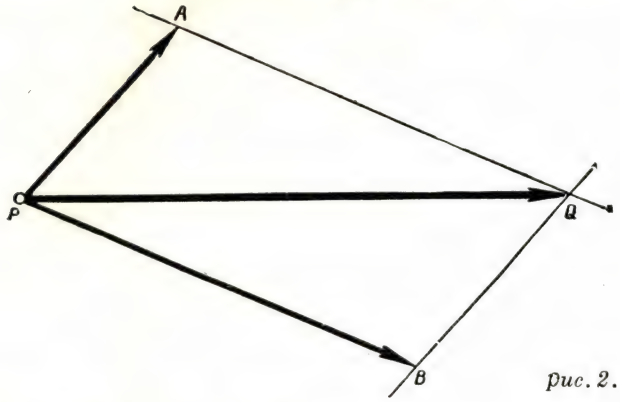


Рис. 2.

формуле совсем не то, что он означает, например, в формуле

$$3+5=8.$$

Обратим внимание на следующее: равнодействующая сила возникает, если заданы две составляющие силы, но она, конечно, не зависит от того, в каком порядке мы записываем эти силы. Поэтому вместо равенства (1) можно написать

$$\overrightarrow{PB}+\overrightarrow{PA}=\overrightarrow{PQ}.$$

Иными словами:

$$\overrightarrow{PA}+\overrightarrow{PB}=\overrightarrow{PB}+\overrightarrow{PA}.$$

Мы получили формулу, не отличающуюся по внешнему виду от соответствующей алгебраической формулы, выражающей переместительный закон сложения:

$$a+b=b+a.$$

Сходство между этими двумя формулами возникло потому, что мы воспользовались для обозначения геометрического сложения тем же знаком, каким пользуются для изображения сложения в арифметике и алгебре.

Правило сложения векторов. Чтобы сложить векторы $\overrightarrow{PA}$ и $\overrightarrow{PB}$,

а) найдем раньше всего середину C отрезка AB, соединяющего концы складываемых векторов (рис. 3);

б) построим точку Q, симметричную точке P относительно точки C, т. е. на прямой PC найдем такую точку Q, чтобы точка C была серединой отрезка PQ. В результате такого построения мы получим диагональ PQ параллелограмма, построенного на заданных векторах $\overrightarrow{PA}$ и $\overrightarrow{PB}$, и поэтому

$$\overrightarrow{PQ}=\overrightarrow{PA}+\overrightarrow{PB}.$$

(Четырехугольник $PAQB$ представляет собой действительно параллелограмм, так как в силу указанного построения его диагонали делят друг друга в точке C пополам.)

Ценность правила середины (так его называют) состоит в том, что оно дает возможность складывать векторы $\overrightarrow{PA}$ и $\overrightarrow{PB}$ и в том случае, когда они лежат на одной прямой (построение параллелограмма на таких векторах, конечно, невозможно).

Из правила середины, очевидно, следует, что:

в результате сложения двух сонаправленных векторов $\overrightarrow{PA}$ и $\overrightarrow{PB}$ (рис. 4*а*) получается вектор $\overrightarrow{PQ}$, имеющий то же направление, что и слагаемые векторы, и длину, равную сумме длин складываемых векторов:

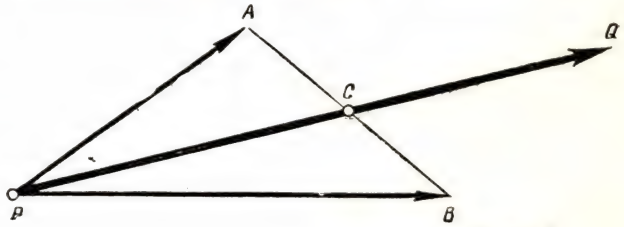


Рис. 3.

Рис. 4а.

Рис. 4б.

в результате сложения двух противоположно направленных векторов $\overrightarrow{PA}$ и $\overrightarrow{PB}$ (рис. 4*б*) получается вектор PQ, имеющий направление большего (по длине) вектора-слагаемого и длину, равную разности [1] длин складываемых векторов.

[1] Это обстоятельство лишний раз напоминает о том, что мы имеем дело с геометрической суммой двух векторов, а не с арифметической суммой двух чисел.

Векторы $\overrightarrow{PA}$ и $\overrightarrow{PB}$, лежащие на одной прямой, независимо от того, направлены они в одну и ту же сторону или в противоположные, называют коллинеарными. Правила их сложения не противоречат тому, что показывает физический опыт при нахождении равнодействующей двух коллинеарных сил.

Очень важно! Особое внимание следует уделить такому случаю, когда складываемые векторы $\overrightarrow{PA}$ и $\overrightarrow{PB}$ не только противоположно направлены, но имеют при этом еще и равные длины (такие векторы называют равнопротивоположными).

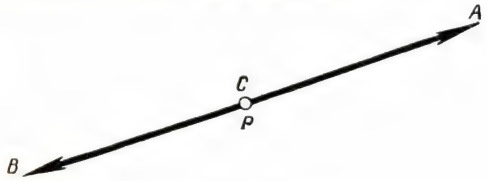


Рис. 5.

Применим правило середины:

1°. Строим середину C отрезка AB, она совпадает, очевидно, с точкой P (рис. 5).

2°. Строим точку Q, симметричную точке P относительно точки C (т. е. в данном случае точки P); получаем, что и точка Q совпадает с точкой P.

Таким образом, если векторы $\overrightarrow{PA}$ и $\overrightarrow{PB}$ равнопротивоположны, то

$$\overrightarrow{PA} + \overrightarrow{PB} = \overrightarrow{PP}.$$

Мы получили вектор особого рода: его конец совпадает с его началом.

Быть может, первое чувство побудит читателя отнестись с недоверием к такому вектору хотя бы уже потому, что у него нет направления.

Но если отказаться от рассмотрения таких «особых» векторов, то придется признать, что не всякие два вектора можно сложить, а это, конечно, нежелательно.

Будем считать, что любые две точки P и Q, независимо от того, различны они или совпадают, определяют направленный отрезок PQ.

Если точки P и Q различны, то необходимо, конечно, указать, какая из них считается первой (началом), какая второй (концом), т. е. необходимо, чтобы эта пара точек была упорядоченной. Если же точки P и Q совпадают, то необходимость указать порядок следования точек отпадает.

Чтобы окончательно убедиться в полезной роли особого вектора, убедитесь, что

$$\overrightarrow{PA} + \overrightarrow{PP} = \overrightarrow{PA} \qquad (2)$$

(доказательство получится сразу, если выполнить сложение по правилу середины).

Это равенство напоминает, конечно, алгебраическое равенство $a+0=a$ и убеждает нас в том, что особый вектор $\overrightarrow{PP}$ играет в теории векторного сложения такую же роль, какую число «0» играет в арифметике; поэтому особый вектор $\overrightarrow{PP}$ принято называть нулевым вектором или нуль-вектором и обозначать его нулем. Равенство (2) запишется поэтому так:

$$\overrightarrow{PA} + \vec{0} = \overrightarrow{PA}.$$

Несколько задач:

1) Известно, что точка P пересечения медиан треугольника ABC делит каждую медиану в отношении $2:1$. Пусть к этой точке P приложены три силы, изображаемые векторами $\overrightarrow{PA}$, $\overrightarrow{PB}$ и $\overrightarrow{PC}$. Определить равнодействующую этой системы сил.

Ответ. Сумма данных сил равна $\overrightarrow{PP}$, следовательно, эта система сил оставляет точку P в равновесии.

2) Точки A_1, A_2, A_3 делят окружность с центром в точке C на три равные между собой дуги. Доказать, что

$$(\overrightarrow{CA_1} + \overrightarrow{CA_2}) + \overrightarrow{CA_3} = \overrightarrow{CC}.$$

3) Доказать, что если точки A и C являются противоположными вершинами параллелограмма $ABCD$, то при любом выборе точки P имеет место равенство

$$\overrightarrow{PA} + \overrightarrow{PC} = \overrightarrow{PB} + \overrightarrow{PD}.$$

4) Если три точки A, B, C различны и не лежат на одной прямой и если имеется еще четвертая точка D, не совпадающая с первыми тремя, то образуется четырехугольник $ABCD$. Каким он должен быть, чтобы при любом выборе точки P было справедливо равенство

$$\overrightarrow{PA} + \overrightarrow{PC} = \overrightarrow{PB} + \overrightarrow{PD}?$$

Ответ. Параллелограммом с противоположными вершинами A и C.

5) Через произвольную точку P внутри окружности с центром O проведены взаимноперпендикулярные хорды AB и CD. Найти равнодействующую двух сил, приложенных в точке P и изображаемых векторами $\overrightarrow{PM}$ и $\overrightarrow{PN}$, где M и N — середины хорд AB и CD.

Ответ. Равнодействующую изображает вектор $\overrightarrow{PO}$.

ГЕОМЕТРИЯ СОЗДАЕТ НОВУЮ АЛГЕБРУ

Что такое сумма трех векторов? Ответ как будто очень прост! Чтобы сложить три вектора, достаточно сложить два из них и к полученному прибавить третий. Однако тут же возникает вопрос: какие же два вектора из заданных трех сложить в первую очередь? Считать ли суммой трех векторов $\overrightarrow{PA}$, $\overrightarrow{PB}$, $\overrightarrow{PC}$ вектор $(\overrightarrow{PA} + \overrightarrow{PB}) + \overrightarrow{PC}$, либо вектор $(\overrightarrow{PB} + \overrightarrow{PC}) + \overrightarrow{PA}$, либо, наконец, вектор $(\overrightarrow{PC} + \overrightarrow{PA}) + \overrightarrow{PB}$.

Аналогичный вопрос должен был возникнуть у читателя еще при изучении арифметики: как составить сумму трех чисел? Считать ли ее равной $(a+b)+c$, или $(b+c)+a$, или, наконец, $(c+a)+b$? Ответ на этот вопрос хорошо известен. Для суммы трех чисел справедлива формула

$$(a+b)+c = a+(b+c),$$

выражающая сочетательный закон сложения.

Может быть, и векторное сложение обладает свойством сочетательности, т. е. справедлива формула

$$(\overrightarrow{PA} + \overrightarrow{PB}) + \overrightarrow{PC} = \overrightarrow{PA} + (\overrightarrow{PB} + \overrightarrow{PC})? \quad (3)$$

Проверка на примере (рис. 6*а*, 6*б*) подтверждает это предположение.

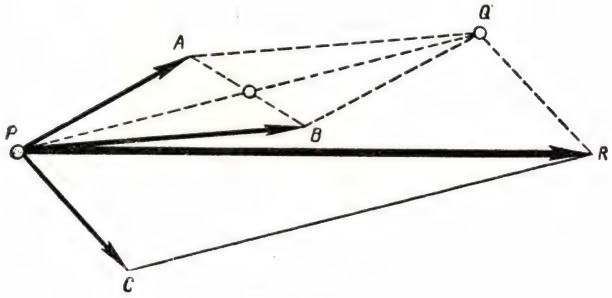


Рис. 6а.

Строгое доказательство формулы (3) использует одну простую геометрическую теорему, которую легко доказать:

Если A', B', C', D' — середины сторон AB, BC, CD, DA произвольного четырехугольника, то середина отрезка $A'C'$ совпадает с серединой отрезка $B'D'$.

При доказательстве этой вспомогательной теоремы нужно рассмотреть все возможные случаи расположения исходных четырех произвольных точек A, B, C, D (два случая воспроизведены на рис. 7*а* и 7*б*).

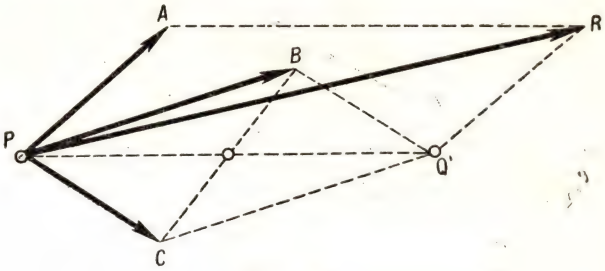


Рис. 6б.

Обратимся теперь к доказательству формулы (3). Возьмем три вектора $\overrightarrow{PA}$, $\overrightarrow{PB}$, $\overrightarrow{PC}$ (рис. 8*а*), построим точки A', B', C', симметричные точке P относительно точек A, B, C соответственно, и обозначим буквами M и N середины сторон $A'B'$ и $B'C'$ четырехугольника $PA'B'C'$.

Примем теперь во внимание, что середина отрезка AB совпадает с серединой отрезка PM; это справедливо в силу упомянутой выше вспо-

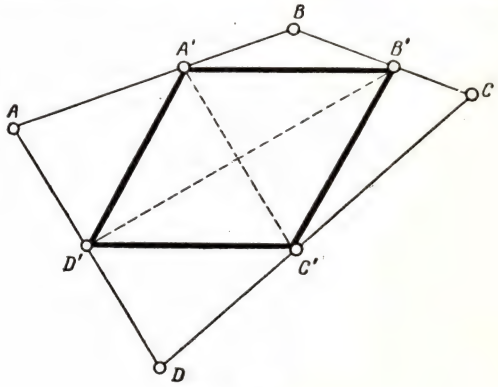


Рис. 7а.

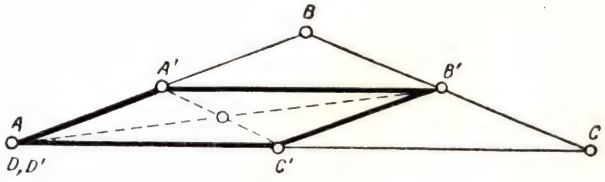


Рис. 7б.

могательной теоремы, если применить ее к четырехугольнику $PA'B'C'$ (второй частный случай — он показан на рис. 7*б*); поэтому, согласно правилу середины,

$$\overrightarrow{PA} + \overrightarrow{PB} = \overrightarrow{PM}.$$

Пусть R — середина отрезка MC, а R' — точка, симметричная точке P относительно точки R. Тогда

$$(\overrightarrow{PA} + \overrightarrow{PB}) + \overrightarrow{PC} = \overrightarrow{PM} + \overrightarrow{PC} = \overrightarrow{PR}.$$

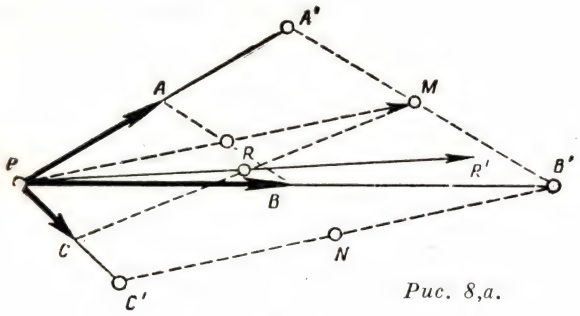


Рис. 8,а.

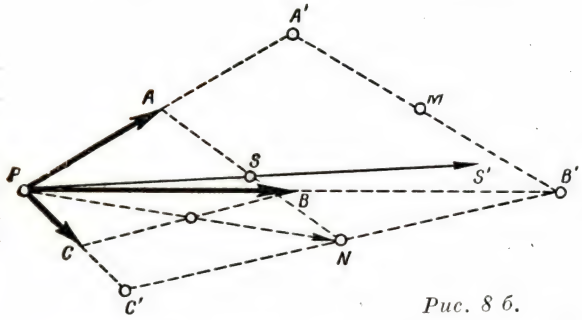


Рис. 8 б.

Аналогично имеем (рис. 8, *б*): $\overrightarrow{PB}+\overrightarrow{PC}=\overrightarrow{PN}$, откуда

$$\overrightarrow{PA}+(\overrightarrow{PB}+\overrightarrow{PC})=\overrightarrow{PA}+\overrightarrow{PN}=\overrightarrow{PS'},$$

где S' — точка, симметричная точке P относительно середины S отрезка AN.

Примем, наконец, во внимание, что точки R и S совпадают — это справедливо в силу указанной выше вспомогательной теоремы, если применить ее к четырехугольнику $PA'B'C'$; отсюда PR' совпадает с PS' и, следовательно,

$$(\overrightarrow{PA}+\overrightarrow{PB})+\overrightarrow{PC}=\overrightarrow{PA}+(\overrightarrow{PB}+\overrightarrow{PC}).$$

Принято поэтому опускать скобки и действие сложения трех векторов записывать так:

$$\overrightarrow{PA}+\overrightarrow{PB}+\overrightarrow{PC}.$$

Сумма многих векторов. Для сложения четырех векторов надо составить сумму трех векторов и полученный вектор сложить с оставшимся четвертым. Результат сложения не будет зависеть от того, какие векторы будут складываться в первую очередь. Теперь это можно доказать уже чисто алгебраически. Убедимся, например, что

$$(\overrightarrow{PA}+\overrightarrow{PB}+\overrightarrow{PC})+\overrightarrow{PD}=\overrightarrow{PA}+(\overrightarrow{PB}+\overrightarrow{PC}+\overrightarrow{PD}).$$

В самом деле:

$$(\overrightarrow{PA}+\overrightarrow{PB}+\overrightarrow{PC})+\overrightarrow{PD}=\{\overrightarrow{PA}+(\overrightarrow{PB}+\overrightarrow{PC})\}+$$
$$+\overrightarrow{PD}=\overrightarrow{PA}+(\overrightarrow{PB}+\overrightarrow{PC})+\overrightarrow{PD}=\overrightarrow{PA}+$$
$$+\{(\overrightarrow{PB}+\overrightarrow{PC})+\overrightarrow{PD}\}=\overrightarrow{PA}+(\overrightarrow{PB}+\overrightarrow{PC}+\overrightarrow{PD}).$$

Легко убедиться, что правило сочетания в группы остается справедливым и для любого числа слагаемых векторов. Их сумму принято поэтому обозначать без скобок:

$$\overrightarrow{PA_1}+\overrightarrow{PA_2}+\ldots+\overrightarrow{PA_{n-1}}+\overrightarrow{PA_n}.$$

Умножение вектора на целое положительное число. Подражая тому, что принято в школьной алгебре, условимся пользоваться в дальнейшем следующими обозначениями:

$$\overrightarrow{PA}+\overrightarrow{PA}=2\cdot\overrightarrow{PA},$$
$$\overrightarrow{PA}+\overrightarrow{PA}+\overrightarrow{PA}=3\cdot\overrightarrow{PA},\ \text{и т. д.} \qquad (4)$$

Естественно при этом условиться говорить, что вектор $n\cdot\overrightarrow{PA}$ получился в результате умножения числа n на вектор $\overrightarrow{PA}$. Этот результат записывают и в таком виде: $\overrightarrow{PA}\cdot n$. Используя сочетательный закон сложения и обозначения (4), легко доказать следующие формулы, удивительно похожие на формулы школьной алгебры:

$$m\overrightarrow{PA}+m\overrightarrow{PB}=m(\overrightarrow{PA}+\overrightarrow{PB}), \qquad (5)$$
$$m\overrightarrow{PA}+n\overrightarrow{PA}=(m+n)\overrightarrow{PA}, \qquad (6)$$
$$m(n\cdot\overrightarrow{PA})=(mn)\overrightarrow{PA}, \qquad (7)$$

где m и n — целые числа.

Умножение вектора на рациональное положительное число $\frac{m}{n}$. Продолжая копировать обозначения, принятые в школьной алгебре, условимся и в нашей «векторной алгебре» писать

$$\overrightarrow{PA}=\frac{m}{n}\cdot\overrightarrow{PQ},\ \text{или}\ \overrightarrow{PA}=\overrightarrow{PQ}\cdot\frac{m}{n}$$

в том случае, когда

$$n\cdot\overrightarrow{PA}=m\cdot\overrightarrow{PQ}.$$

Отсюда следует, что (это нетрудно доказать) и в случае умножения вектора на рациональное число справедливы следующие формулы:

$$\frac{m}{n}(\overrightarrow{PA}+\overrightarrow{PB})=\frac{m}{n}\overrightarrow{PA}+\frac{m}{n}\overrightarrow{PB}, \qquad (8)$$
$$\left(\frac{m_1}{n_1}+\frac{m_2}{n_2}\right)\overrightarrow{PA}=\frac{m_1}{n_1}\overrightarrow{PA}+\frac{m_2}{n_2}\overrightarrow{PA}, \qquad (9)$$
$$\frac{m_1}{n_1}\left(\frac{m_2}{n_2}\cdot\overrightarrow{PA}\right)=\left(\frac{m_1}{n_1}\cdot\frac{m_2}{n_2}\right)\overrightarrow{PA}. \qquad (10)$$

Эти формулы содержат в себе как частные случаи уже доказанные раньше формулы (5), (6), (7).

Как умножить вектор на число —1. Опять используем указания школьной алгебры. Вспомним, что

$$(-1)\,a+a=0.$$

Естественно поэтому принять, что

$$(-1)\overrightarrow{PA}+\overrightarrow{PA}=\overrightarrow{PP},$$

т. е. считать, что вектор $(-1)\cdot\overrightarrow{PA}$ есть вектор, равно-противоположный вектору $\overrightarrow{PA}$.

Умножение вектора на отрицательное рациональное число. Эту операцию будем производить по следующему способу:

$$\overrightarrow{PA}\cdot\left(-\frac{m}{n}\right)=\left(\overrightarrow{PA}\cdot\frac{m}{n}\right)\cdot(-1).$$

Иными словами, будем считать, что вектор $(-\frac{m}{n})\cdot\overrightarrow{PA}$ есть вектор, противоположный вектору $\frac{m}{n}\overrightarrow{PA}$. Целесообразность этого правила проявляется, например, в том, что из него, как это можно доказать, вытекает справедливость формул (7), (8) и (9) и в том случае, когда какие-либо из входящих в них числовых множителей имеют отрицательные и даже нулевые значения. Придется только еще принять, что

$$0\cdot\overrightarrow{PA}=\overrightarrow{PP}=\overrightarrow{0}.$$

Этого условия мы и будем в дальнейшем придерживаться.

Вычитание векторов. Эту операцию определяем как обратную операции сложения векторов.

Вектор $\overrightarrow{PQ}$ называется разностью векторов $\overrightarrow{PR}$ и $\overrightarrow{PS}$:

$$\overrightarrow{PQ}=\overrightarrow{PR}-\overrightarrow{PS},$$

если уменьшаемый вектор $\overrightarrow{PR}$ равен сумме вектора-разности $\overrightarrow{PQ}$ и вектора-вычитаемого $\overrightarrow{PS}$, т. е. если

$$\overrightarrow{PR}=\overrightarrow{PQ}+\overrightarrow{PS}.$$

Очень важно уяснить и запомнить следующее правило: нахождение разности $\overrightarrow{PR}-\overrightarrow{PS}$ равносильно нахождению суммы уменьшаемого $\overrightarrow{PR}$ и вектора, обратного вычитаемому (рис. 9), т. е.

$$\overrightarrow{PR}-\overrightarrow{PS}=\overrightarrow{PR}+(-1)\cdot\overrightarrow{PS}. \qquad (11)$$

В самом деле:

$$[\overrightarrow{PR}+(-1)\cdot\overrightarrow{PS}]+\overrightarrow{PS}=\overrightarrow{PR}+[(-1)\cdot\overrightarrow{PS}+\overrightarrow{PS}]=$$
$$=\overrightarrow{PR}+\overrightarrow{PP}=\overrightarrow{PR}.$$

Эта замена вычитания сложением дает возможность легко вывести важные (как и в школьной алгебре) формулы для вычитания суммы и разности:

$$\overrightarrow{PA}-(\overrightarrow{PB}+\overrightarrow{PC})=\overrightarrow{PA}+(-1)\cdot\overrightarrow{PB}+(-1)\cdot\overrightarrow{PC}, \qquad (12)$$

$$\overrightarrow{PA}-(\overrightarrow{PB}-\overrightarrow{PC})=\overrightarrow{PA}+(-1)\cdot\overrightarrow{PB}+\overrightarrow{PC}. \qquad (13)$$

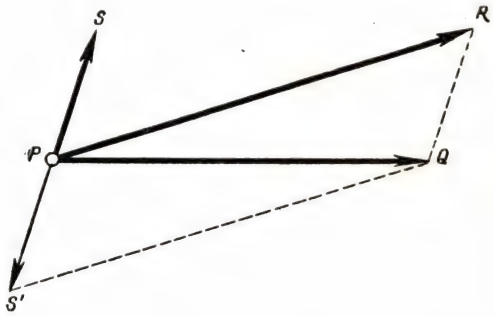


Рис. 9.

Докажем, например, вторую из этих формул:

$$\overrightarrow{PA}-(\overrightarrow{PB}-\overrightarrow{PC})=\overrightarrow{PA}+(-1)\cdot[\overrightarrow{PB}+(-1)\cdot\overrightarrow{PC}]=$$
$$=\overrightarrow{PA}+(-1)\cdot\overrightarrow{PB}+(-1)\cdot(-1)\cdot\overrightarrow{PC}=$$
$$=\overrightarrow{PA}+(-1)\cdot\overrightarrow{PB}+\overrightarrow{PC}.$$

Еще одно заимствование из школьной алгебры. На уроках алгебры ставится иногда вопрос: можно ли сказать, что число $-a$ есть отрицательное число?

Ответ ясен: так сказать нельзя. Ведь

$$-a=(-1)\,a,$$

и поэтому если a отрицательное число, то $-a$ положительное число; и только в том случае, когда a положительное число, $-a$ отрицательное. Числа a и $-a$ называют, как известно, **взаимно-противоположными**.

Подражая и на этот раз положениям школьной алгебры, примем, что:

$$(-1)\,\overrightarrow{PA}=-\overrightarrow{PA},$$

т. е. будем считать, что $-\overrightarrow{PA}$ есть вектор, противоположный вектору $\overrightarrow{PA}$ [1].

[1] Обратим внимание на то, что ни один из этих векторов нельзя назвать отрицательным, так как мы не установили (и не будем устанавливать) понятия «положительный вектор».

Это обозначение дает нам возможность переписать формулы (11), (12), (13) в виде, привычном для каждого школьника, знающего правила раскрытия скобок, перед которыми стоит знак минус:

$$\overrightarrow{PR}-\overrightarrow{PS}=\overrightarrow{PR}+(-\overrightarrow{PS}),$$

$$\overrightarrow{PA}-(\overrightarrow{PB}+\overrightarrow{PC})=\overrightarrow{PA}-\overrightarrow{PB}-\overrightarrow{PC},$$

$$\overrightarrow{PA}-(\overrightarrow{PB}-\overrightarrow{PC})=\overrightarrow{PA}-\overrightarrow{PB}+\overrightarrow{PC}.$$

Еще большее сходство с формулами школьной алгебры возникает, если условиться, краткости ради, обозначать каждый вектор только одной буквой, например:

$$\overrightarrow{PA}=\bar{a},\ \overrightarrow{PB}=\bar{b},\ \overrightarrow{PC}=\bar{c},\ \text{и т. п.}$$

Над этими буквами ($\bar{a}, \bar{b}, \bar{c}$) поставлены черточки, чтобы напомнить читателю, что он имеет дело с вектором, а не с числом.

Приняты и такие обозначения для векторов:

$$\overrightarrow{PA}=\boldsymbol{a},\ \overrightarrow{PB}=\boldsymbol{b},\ \overrightarrow{PC}=\boldsymbol{c},$$

т. е. принято в печати обозначать вектор буквой полужирного шрифта.

ВЕКТОРНАЯ АЛГЕБРА НА СЛУЖБЕ У ГЕОМЕТРИИ

Геометрия, создавшая новую алгебру, алгебру векторов, сама пользуется ее услугами. Приведем несколько примеров решения геометрических задач при помощи векторной алгебры.

Рис. 10.

Первый пример. Пусть задан произвольный треугольник $M_1M_2M_3$ (рис. 10). Выбрав некоторую точку M_0, построим точку M_0', симметричную точке M_0 относительно точки M_1.

Построим, далее, точку M_0'', симметричную точке M_0' относительно точки M_2 и, наконец, построим точку M_0''', симметричную точке M_0'' относительно точки M_3.

Выполнив эти построения, обнаруживаем, что на нашем чертеже точка M_0''' не совпадает с точкой M_0.

Возникает такой вопрос: можно ли, считая заданными точки M_1, M_2, M_3, выбрать четвертую точку M_0 таким образом, чтобы полученная (в результате указанных трех симметрий) точка M_0''' совпала с точкой M_0?

Прежде чем разбирать приведенное здесь решение, попытайтесь самостоятельно решить эту задачу.

Решение. Положим, что искомая точка M_0 найдена. Выберем какую-либо произвольную точку P и введем в рассмотрение векторы $\overrightarrow{PM_1}$, $\overrightarrow{PM_2}$, $\overrightarrow{PM_3}$, а также и векторы $\overrightarrow{PM_0}$, $\overrightarrow{PM_0'}$, PM_0'', PM_0''', которые для краткости обозначим соответственно $\boldsymbol{r}_1, \boldsymbol{r}_2, \boldsymbol{r}_3$ и $\boldsymbol{r}_0, \boldsymbol{r}_0', \boldsymbol{r}_0'', \boldsymbol{r}_0'''$ (сделайте чертеж!). По условию задачи точка M_1 является серединой отрезка M_0M_0'; отсюда следует (по правилу середины для сложения векторов), что

$$\overrightarrow{PM_0}+\overrightarrow{PM_0'}=2\overrightarrow{PM_1},$$

или, в более удобной записи,

$$\boldsymbol{r}_0+\boldsymbol{r}_0'=2\boldsymbol{r}_1$$

(напоминаем:

$$\overrightarrow{PM_0}\equiv\boldsymbol{r}_0,\ \overrightarrow{PM_1}\equiv\boldsymbol{r}_1 \text{ и } \overrightarrow{PM_0'}\equiv\boldsymbol{r}_0').$$

Отсюда получим:

$$\boldsymbol{r}_0'=2\boldsymbol{r}_1-\boldsymbol{r}_0. \qquad \text{(A)}$$

Учтем теперь, что по условию задачи точка M_0'' симметрична точке M_0' относительно точки M_2. Повторяя рассуждения, аналогичные только что проведенным, получим следующее равенство:

$$\boldsymbol{r}_0''=2\boldsymbol{r}_2-\boldsymbol{r}_0'.$$

Заменяя в этом равенстве $\boldsymbol{r}_0'$ его выражением (A), получим:

$$\boldsymbol{r}_0''=2\boldsymbol{r}_2-(2\boldsymbol{r}_1-\boldsymbol{r}_0),$$

или, раскрывая скобки,

$$\boldsymbol{r}_0''=2\boldsymbol{r}_2-2\boldsymbol{r}_1+\boldsymbol{r}_0. \qquad \text{(B)}$$

Учитывая, наконец, что точка M_0''' симметрична точке M_0'' относительно точки M_3, получим аналогичным образом:

$$\boldsymbol{r}_0'''=2\boldsymbol{r}_3-\boldsymbol{r}_0''.$$

Подставляя вместо r''_0 его выражение (В) и раскрывая скобки (по правилам векторной алгебры), получим:

$$r'''_0 = 2r_3 - 2r_2 + 2r_1 - r_0.$$

Теперь уже нетрудно выяснить условия, при которых точка M'''_0 совпадает с точкой M_0. Это случится, если вектор $\overrightarrow{PM'''_0} \equiv r'''_0$ совпадет с вектором $\overrightarrow{PM_0} \equiv r_0$, т. е. если

$$r_0 = 2r_3 - 2r_2 + 2r_1 - r_0.$$

После несложных преобразований получим

$$r_3 + r_1 = r_2 + r_0,$$

или

$$\overrightarrow{PM_3} + \overrightarrow{PM_1} = \overrightarrow{PM_2} + \overrightarrow{PM_0}.$$

А это равенство имеет место только в том случае, когда середина отрезка M_3M_1 совпадает с серединой отрезка M_2M_0, т. е. когда точки M_1, M_2, M_3, M_0 образуют параллелограмм, у которого точки M_1 и M_3 — противоположные вершины [1].

Таким образом, точку M_0 нужно выбрать (если мы хотим, чтобы M'''_0 совпадала с M_0) так, чтобы она была четвертой вершиной параллелограмма, имеющего три вершины в точках M_1, M_2, M_3 и для которого M_1 и M_3 — противоположные вершины.

Естественно возникает теперь мысль применить новый, векторный метод решения к аналогичной, но более сложной задаче: по заданным четырем точкам M_1, M_2, M_3, M_4 найти точку M_0 такую, чтобы в результате последовательного ее «отражения» [2] от точек M_1, M_2, M_3, M_4 получилась точка M''''_0, совпадающая с исходной точкой M_0.

Не составит труда убедиться (это читатель сделает самостоятельно), что

$$\overrightarrow{PM''''_0} = 2\overrightarrow{PM_4} - 2\overrightarrow{PM_3} + 2\overrightarrow{PM_2} - 2\overrightarrow{PM_1} + \overrightarrow{PM_0}. \qquad (14)$$

Из этой формулы следует, что совпадение точки M''''_0 с точкой M_0, т. е. совпадение векторов $\overrightarrow{PM''''_0}$ и $\overrightarrow{PM_0}$, возможно только в том случае, когда

$$\overrightarrow{PM_4} - \overrightarrow{PM_3} + \overrightarrow{PM_2} - \overrightarrow{PM_1} = \overrightarrow{0}. \qquad (15)$$

[1] См. задачу 4 на стр. 176.

[2] Т. е. построения точки M'_0, симметричной точке M_0 относительно точки M_1, последующего построения точки M''_0, симметричной точке M'_0 относительно точки M_2, и т. д.

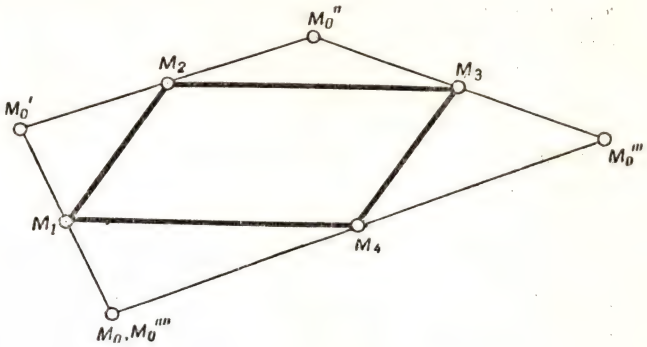


Рис. 11а.

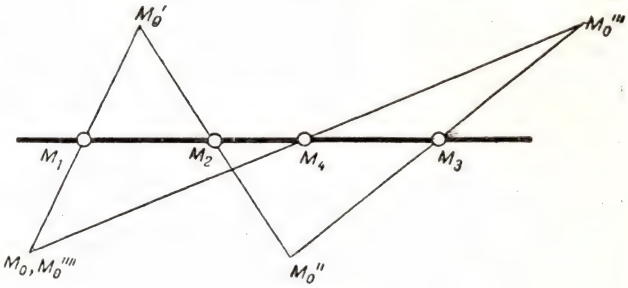


Рис. 11б.

Это значит, что если точки M_1, M_2, M_3, M_4 не лежат на одной прямой, то они должны образовать параллелограмм, у которого M_1 и M_3 — противоположные вершины (рис. 11*а*).

Если же эти точки лежат на одной прямой, то они должны быть расположены так, чтобы середина отрезка M_1M_3 совпадала с серединой отрезка M_2M_4 (рис. 11*б*).

Таким образом, если заданные точки M_1, M_2, M_3, M_4 не имеют только что указанного расположения, наша задача не имеет ни одного решения. Если же заданные точки M_1, M_2, M_3, M_4 имеют указанное расположение, то в силу равенства (15) равенство (14) принимает вид $\overrightarrow{PM''''_0} = \overrightarrow{PM_0}$, из чего следует, что в этом случае любая точка M_0 переходит в результате четырех последовательных отражений в точку M''''_0, совпадающую с точкой M_0.

Обратим внимание на то, что точка M_0 может быть в этом случае выбрана даже и вне той плоскости, в которой расположены исходные четыре точки M_1, M_2, M_3, M_4.

Может быть, теперь у читателя возникло желание выяснить, к какому результату приведет решение аналогичной задачи в том случае,

когда число заданных точек будет равно пяти, шести и т. д. Не подсказывая полного решения, скажем только, что если, например, задано шесть точек (M_1, M_2, M_3, M_4, M_5, M_6), то существование такой точки M_0, которая после 6 отражений вернется в исходное положение, возможно только в том случае, когда точка пересечения медиан треугольника $M_1M_3M_5$ совпадает с точкой пересечения медиан треугольника $M_2M_4M_6$.

Укажем теперь несколько задач, с помощью которых читатель может проверить, научился ли он применять векторную алгебру к решению геометрических задач.

1. Произвольную точку M_0 отразим последовательно от вершин треугольника $M_1M_2M_3$. Полученную точку M_0''' (которая, как показано выше, не совпадает с точкой M_0) снова отразим последовательно от тех же точек M_1, M_2, M_3. Доказать, что в результате этих шести последовательных отражений получится... исходная точка M_0.

2. Отразим произвольную точку P_0 последовательно от вершин пирамиды $M_1M_2M_3M_4$. Полученную точку P_1 также отразим последовательно от вершин M_1, M_2, M_3, M_4; мы получим точку P_2 и отразим ее последовательно от вершин M_1, M_2, M_3, M_4; получим точку P_3, и т. д.

Доказать, что точки P_0, P_1, P_2, P_3, P_4,... лежат на одной прямой, и притом так, что каждая из них (начиная с P_1) является серединой отрезка, определяемого предыдущей и последующей точками.

Равенство векторов. Условимся считать, что вектор $\overrightarrow{AB}$ геометрически равен вектору $\overrightarrow{A'B'}$, если середина отрезка AB' совпадает с серединой отрезка BA' (рис. 12*а*, 12*б*, 12*в*).

Если при этом точки A, B, A', B' не лежат на одной прямой, то четырехугольник $ABB'A'$ будет, очевидно, параллелограммом (как четырехугольник, диагонали которого делят друг друга пополам), в котором точки A и B' являются противоположными вершинами. Следовательно, длина отрезка AB равна длине отрезка $A'B'$, прямая AB параллельна прямой $A'B'$.

Наглядное представление подсказывает нам, что при этом вектор $\overrightarrow{AB}$ сонаправлен с вектором $\overrightarrow{A'B'}$.

Можно доказать следующие теоремы:

1. Если вектор $\overrightarrow{AB}$ геометрически равен вектору $\overrightarrow{A'B'}$, то вектор $\overrightarrow{A'B'}$ геометрически равен вектору $\overrightarrow{AB}$.

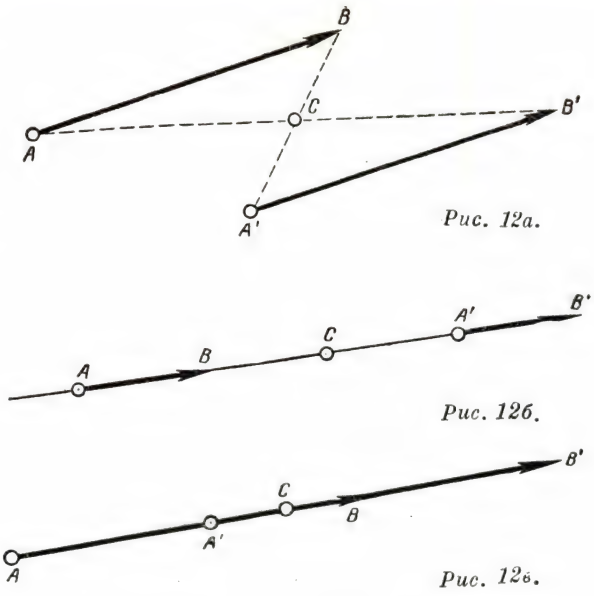


Рис. 12а.

Рис. 12б.

Рис. 12в.

2. Вектор $\overrightarrow{AB}$ геометрически равен вектору $\overrightarrow{AB}$, т. е. самому себе.

3. Если вектор $\overrightarrow{AB}$ геометрически равен вектору $\overrightarrow{A'B'}$ и вектор $\overrightarrow{A'B'}$ геометрически равен вектору $\overrightarrow{A''B''}$, то вектор $\overrightarrow{AB}$ геометрически равен вектору $\overrightarrow{A''B''}$.

Справедливость первых двух теорем сразу следует из определения геометрического равенства векторов. Для доказательства третьей теоремы обратим внимание на то, что если вектор $\overrightarrow{AB}$ геометрически равен вектору $\overrightarrow{A'B'}$, то, как легко видеть,

$$\overrightarrow{PA} + \overrightarrow{PB'} = \overrightarrow{PB} + \overrightarrow{PA'}, \qquad (16)$$

где P — произвольная точка. Справедливо также обратное предположение: если имеет место равенство (16), то вектор $\overrightarrow{AB}$ геометрически равен вектору $\overrightarrow{A'B'}$ (так как равенство (16) может, очевидно, иметь место только в том случае, когда середина отрезка AB' совпадает с серединой отрезка BA').

Учтем теперь, что если вектор $\overrightarrow{AB}$ геометрически равен вектору $\overrightarrow{A''B''}$, то

$$\overrightarrow{PA'} + \overrightarrow{PB''} = \overrightarrow{PB'} + \overrightarrow{PA''}. \qquad (17)$$

Складывая почленно равенства (16) и (17), получим после сокращений:

$$\overrightarrow{PA} + \overrightarrow{PB''} = \overrightarrow{PB} + \overrightarrow{PA''},$$

откуда следует (в силу только что доказанного обратного предложения), что вектор $\overrightarrow{AB}$ геометрически равен вектору $\overrightarrow{A''B''}$, и т. д.

Читатель заметил, конечно, что три теоремы о геометрическом равенстве векторов имеют такую же внешнюю форму, как и известные из арифметики свойства равенства чисел:

1) Если $\alpha=\beta$, то $\beta=\alpha$.
2) $\alpha=\alpha$.
3) Если $\alpha=\beta$ и $\beta=\gamma$, то $\alpha=\gamma$.

В силу такого сходства целесообразно пользоваться записью

$$\overrightarrow{AB}=\overrightarrow{A'B'}$$

для обозначения того, что вектор $\overrightarrow{AB}$ геометрически равен вектору $\overrightarrow{A'B'}$. Наши три теоремы о геометрическом равенстве векторов примут следующий вид:

1) Если $\overrightarrow{AB}=\overrightarrow{A'B'}$, то $\overrightarrow{A'B'}=\overrightarrow{AB}$.
2) $\overrightarrow{AB}=\overrightarrow{AB}$.
3) Если $\overrightarrow{AB}=\overrightarrow{A'B'}$ и $\overrightarrow{A'B'}=\overrightarrow{A''B''}$, то $\overrightarrow{AB}=\overrightarrow{A''B''}$.

Принято также, ради краткости, говорить, что вектор $\overrightarrow{AB}$ равен вектору $\overrightarrow{A'B'}$ в том случае, когда вектор $\overrightarrow{AB}$ геометрически равен вектору $\overrightarrow{A'B'}$. Однако не следует забывать при этом, что слово «равен» имеет здесь совсем другой смысл, чем в арифметике. Безопаснее было бы, конечно, всегда говорить: геометрически равен.

Чтобы подчеркнуть различие в содержании термина равен, обратим внимание на следующее.

В арифметике, если число α не равно числу β, то число α либо больше числа β, либо меньше его. В векторной алгебре, если вектор $\overrightarrow{AB}$ не равен вектору $\overrightarrow{A'B'}$, то отсюда еще не следует, что вектор $\overrightarrow{AB}$ либо больше вектора $\overrightarrow{A'B'}$, либо меньше его, так как в векторной алгебре не устанавливается смысл выражения «вектор $\overrightarrow{AB}$ больше (меньше) вектора $\overrightarrow{A'B'}$»[1].

Как построить вектор, равный заданному вектору? Пусть $\overrightarrow{AB}$ — заданный вектор и M — некоторая произвольная точка. Построим сумму векторов $\overrightarrow{AB}$ и $\overrightarrow{AM}$ (сделайте чертеж!); пусть

$$\overrightarrow{AB}+\overrightarrow{AM}=\overrightarrow{AN}. \qquad (17\text{а})$$

Учитывая, что середина отрезка AN совпадает с серединой отрезка BM, приходим к выводу, что

$$\overrightarrow{AB}=\overrightarrow{MN}.$$

Таким образом, искомый вектор построен.

Легко видеть, что это построение однозначно, т. е. что существует только единственный вектор, имеющий начало в точке M и геометрически равный вектору $\overrightarrow{AB}$: ведь если бы существовала точка N', отличная от точки N и такая, что

$$\overrightarrow{AB}=\overrightarrow{MN'},$$

то имело бы место равенство

$$\overrightarrow{AB}+\overrightarrow{AM}=\overrightarrow{AN'},$$

противоречащее равенству (17а).

Задача о средней линии четырехугольника. Средней линией трапеции называют, как известно, отрезок, соединяющий середины ее непараллельных сторон. Естественно поэтому назвать средней линией произвольного четырехугольника $ABCD$ отрезок, соединяющий середины его противоположных сторон (например, AD и BC)[1].

Поставим теперь следующую задачу.

Пусть $ABCD$ (рис. 13*а*) — произвольный четырехугольник (даже такой, у которого стороны пересекаются (рис. 13*б*), или, скажем, косой, т. е. такой, у которого вершины не лежат в одной плоскости). Выбрав произвольным образом две точки A' и D', построим векторы $\overrightarrow{A'B'}$ и $\overrightarrow{C'D'}$, равные соответственно векторам $\overrightarrow{AB}$ и $\overrightarrow{CD}$.

Проведем среднюю линию MN, соединяющую стороны AD и BC четырехугольника $ABCD$, и среднюю линию $M'N'$ четырехугольника $A'B'C'D'$, соединяющую стороны $A'D'$ и $B'C'$.

Требуется доказать, что средние линии MN и $M'N'$ имеют одинаковую длину и расположены на параллельных прямых (или на одной и той же прямой).

Для доказательства достаточно убедиться, что векторы $\overrightarrow{MN}$ и $\overrightarrow{M'N'}$ геометрически равны, т. е. что

$$\overrightarrow{PM}+\overrightarrow{PN'}=\overrightarrow{PN}+\overrightarrow{PM'}, \qquad (18)$$

где P — произвольная точка (поэтому точка P и не показана на рис. 13*а* и 13*б*).

[1] Это не противоречит тому, что выражение «длина вектора $\overrightarrow{AB}$ больше (меньше) длины вектора $\overrightarrow{A'B'}$» имеет вполне определенный смысл.

[1] Отметим, что использованная нами на стр. 177 теорема теперь может быть сформулирована так: две средние линии четырехугольника делят друг друга пополам.

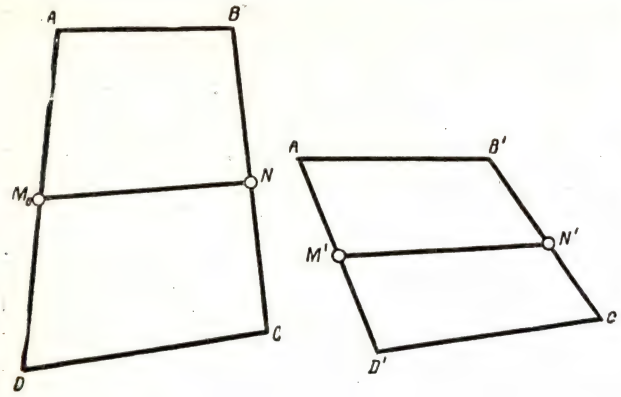


Рис. 13а.

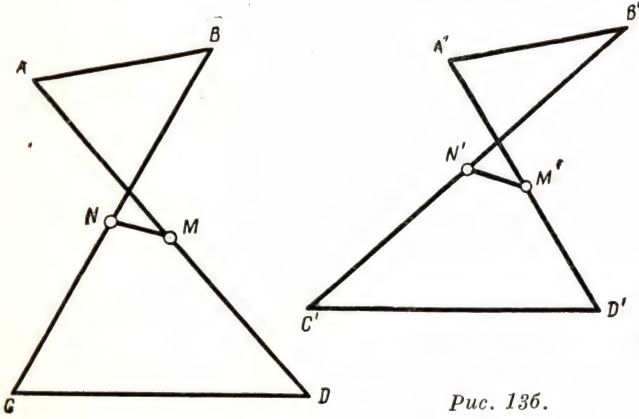


Рис. 13б.

Примем во внимание, что по условию задачи

$$\overrightarrow{PM} = \frac{1}{2}(\overrightarrow{PA} + \overrightarrow{PD});\ \overrightarrow{PN} = \frac{1}{2}(\overrightarrow{PB} + \overrightarrow{PC});$$

$$\overrightarrow{PM'} = \frac{1}{2}(\overrightarrow{PA'} + \overrightarrow{PD'});\ \overrightarrow{PN'} = \frac{1}{2}(\overrightarrow{PB'} + \overrightarrow{PC'})$$

и, следовательно, подлежащее доказательству равенство (18) может быть после сокращения на множитель $\frac{1}{2}$ записано так:

$$\overrightarrow{PA} + \overrightarrow{PD} + \overrightarrow{PB'} + \overrightarrow{PC'} = \overrightarrow{PB} + \overrightarrow{PC} + \overrightarrow{PA'} + \overrightarrow{PD'}. \quad (19)$$

Так как по условию задачи

$$\overrightarrow{AB} = \overrightarrow{A'B'} \text{ и } \overrightarrow{DC} = \overrightarrow{D'C'},$$

то

$$\overrightarrow{PA} + \overrightarrow{PB'} = \overrightarrow{PB} + \overrightarrow{PA'},$$

$$\overrightarrow{PD} + \overrightarrow{PC'} = \overrightarrow{PC} + \overrightarrow{PD'}.$$

Складывая эти равенства почленно, получим (19).

Заключительные задачи. О других положениях векторной алгебры и об их применении к решению геометрических задач и доказательству геометрических теорем можно узнать из специальных книг. Однако сначала полезно проверить, хорошо ли усвоено прочитанное в статье. С этой целью предлагаем несколько заключительных задач.

1. Точки A_0, A_1, A_2, A_3, A_4... расположены на прямой линии так, что каждая из них является серединой отрезка, образованного предыдущей и последующей точками. Доказать, что

$$\overrightarrow{PA_1} = \overrightarrow{PA_0} + (\overrightarrow{PA_1} - \overrightarrow{PA_0})\cdot 1,$$
$$\overrightarrow{PA_2} = \overrightarrow{PA_0} + (\overrightarrow{PA_1} - \overrightarrow{PA_0})\cdot 2,$$
$$\overrightarrow{PA_3} = \overrightarrow{PA_0} + (\overrightarrow{PA_1} - \overrightarrow{PA_0})\cdot 3, \text{ и т. д.}$$

2. На отрезке A_0A_1 расположены точки B_0, B_1, B_2, B_3,... B_{n-1}, B_n так, что B_0 совпадает с A_0, B_n с A_1, а каждая из остальных точек есть середина отрезка, образованного предыдущей и последующей точками. Доказать, что

$$\overrightarrow{PB_1} = \overrightarrow{PA_0} + (\overrightarrow{PA_1} - \overrightarrow{PA_0})\cdot \frac{1}{n},$$
$$\overrightarrow{PB_2} = \overrightarrow{PA_0} + (\overrightarrow{PA_1} - \overrightarrow{PA_0})\cdot \frac{2}{n},$$
$$\overrightarrow{PB_3} = \overrightarrow{PA_0} + (\overrightarrow{PA_1} - \overrightarrow{PA_0})\cdot \frac{3}{n},$$

и т. д.

3. Как расположены точки C_1, C_2, C_3,..., если известно, что

$$\overrightarrow{PC_1} = \overrightarrow{PA_0} + (\overrightarrow{PA_1} - \overrightarrow{PA_0})\cdot \left(\frac{1}{n}\right),$$
$$\overrightarrow{PC_2} = \overrightarrow{PA_0} + (\overrightarrow{PA_1} - \overrightarrow{PA_0})\cdot \left(\frac{2}{n}\right),$$
$$\overrightarrow{PC_3} = \overrightarrow{PA_0} + (\overrightarrow{PA_1} - \overrightarrow{PA_0})\cdot \left(\frac{3}{n}\right),$$

и т. д.?

4. Доказать: если точка C есть пересечение медиан треугольника $A_1A_2A_3$, то

$$\overrightarrow{PC} = \frac{1}{3}(\overrightarrow{PA_1} + \overrightarrow{PA_2} + \overrightarrow{PA_3}),$$

где P — произвольная точка (точку C называют центроидом системы трех точек A_1, A_2, A_3).

5. Соединим каждую из четырех точек A_1, A_2, A_3, A_4 с центроидом системы оставшихся трех точек. Полученные четыре отрезка пересекаются в одной точке C, для которой

$$\overrightarrow{PC} = \frac{1}{4}(\overrightarrow{PA_1} + \overrightarrow{PA_2} + \overrightarrow{PA_3} + \overrightarrow{PA_4}),$$

где P — произвольная точка. (Точка C называется центроидом системы четырех точек A_1, A_2, A_3, A_4. Она делит каждый отрезок в отношении 1 : 3.)

6. Обобщить предыдущую задачу для случая, когда задано 5 точек, 6 точек и т. д.

ЧИСЛА И ДЕЙСТВИЯ

Если вы спросите, чем занимается алгебра, то, по всей вероятности, услышите весьма различные ответы. Вам могут сказать, что алгебра занимается решением уравнений (и решением практических задач с помощью уравнений). И, конечно, это не будет неправильным! Ведь вопросы решения уравнений того или иного вида занимают большое место во многих разделах школьного курса алгебры. И все же такой ответ будет неполным! Действительно, если, скажем, вы решаете уравнение

$$\frac{1}{x^2-x}+\frac{2x}{x^2-2x+1}=\frac{9}{x},$$

то для этого нужно уметь производить разложение на множители (для приведения дробей к общему знаменателю), уметь раскрывать скобки, приводить подобные члены и т. п. Иными словами, надо уметь правильно производить различные д е й с т в и я.

Действия, которые необходимо произвести для решения уравнения, выполняются над ч и с л а м и. Дело не меняется от того, что в уравнение входят буквы, выражающие известные или неизвестные величины: ведь буквы в алгебре применяются для обозначения чисел. А для того чтобы производить действия над числами, надо знать правила выполнения действий, з а к о н ы д е й с т в и й. Изучению этих правил посвящена значительная часть школьного курса алгебры. Примерами могут служить: распределительный закон

$$a(b+c)=ab=bc,$$

на основании которого выполняется раскрытие скобок и вынесение множителей за скобки; правила действий со степенями:

$$a^b\cdot a^c=a^{b+c},\ (a^b)^c=a^{bc}$$

и т. д.

Таким образом, уравнения и свойства действий — вот две основные составные части школьного курса алгебры. Правда, в настоящее время в этом курсе изучается еще один раздел — учение о функциях и их графиках. Однако этот раздел является посторонним для алгебры, и, возможно, в будущем он будет входить не в курс алгебры, а в отдельный предмет, посвященный изучению функций.

Разграничение круга вопросов алгебры на два раздела — одного, связанного с теорией многочленов и уравнений, и другого, связанного со свойствами действий,— имеет место не только в школьном курсе алгебры, но также и в курсе, изучаемом в высших учебных заведениях и даже в трудах современных ученых. Разумеется, оба эти раздела тесно связаны между собой.

МНОГО ЛИ НУЖНО ЧИСЕЛ ДЛЯ РЕШЕНИЯ УРАВНЕНИЙ?

Самые простые уравнения — это уравнения первой степени с одним неизвестным. Самые привычные для нас числа — это целые положительные числа, с которыми мы встречаемся еще в раннем детстве при пересчете предметов. Если мы будем рассматривать только такие уравнения первой степени с одним неизвестным, которые имеют своими коэффициентами целые положительные числа, то сможем с их помощью решать очень многие задачи. Например, любую задачу по арифметике из задачника III или IV класса, идущую до раздела о дробях, можно решить, конечно, «по вопросам», как и делают учащиеся этих классов. Но можно также составить для такой задачи уравнение и найти ответ, решив это уравнение. При решении такого уравнения нужно уметь обращаться только с целыми положительными числами; и ответ будет целым положительным числом. (Ведь других чисел учащиеся этих классов еще не знают, поэтому задачи подобраны лишь такие, в которых ответ является числом целым и положительным!)

Можем ли мы из этого заключить, что вообще никаких других чисел, кроме целых положительных, и знать не нужно, чтобы уметь решать любые уравнения? Конечно нет! Возьмем, например, уравнение

$$ax+b=c, \qquad (1)$$

в котором коэффициенты a, b, и c — целые положительные числа (к такому виду можно привести любое уравнение первой степени с целыми положительными коэффициентами). Для его решения нужно сначала перенести число b в правую часть равенства, т. е. переписать уравнение в виде $ax=c-b$, а затем разделить разность $c-b$ на a; в результате мы получим

$$x=\frac{c-b}{a}.$$

Если мы захотим научиться решать любое уравнение с целыми положительными коэффициентами, то, во-первых, нам нужно научиться

вычислять разность $c-b$. Это необходимо приводит к введению отрицательных (целых) чисел, так как при $b>c$ приходится вычитать из меньшего числа большее. Во-вторых, мы должны уметь делить разность $c-b$ на a. Это приводит к введению рациональных чисел, т. е. чисел не только целых, но и дробных (включая также и отрицательные дроби).

Итак, для решения любых уравнений первой степени с целыми положительными коэффициентами надо иметь «в запасе» (чтобы можно было записать ответ) все рациональные числа. Это и послужило одной из побудительных причин введения дробных и отрицательных чисел в математику. Имея же в своем распоряжении все рациональные числа, мы можем решать уравнения первой степени не только с целыми положительными, но и с любыми рациональными коэффициентами (за исключением, конечно, случаев, когда коэффициент a в уравнении (1) равен нулю — ведь в этом случае неизвестное x совсем не входит в рассматриваемое «уравнение»). Иначе говоря, для решения уравнений первой степени ничего другого, кроме рациональных чисел, и знать не нужно. Нетрудно понять, чем объясняются эти удобные (в отношении решения уравнений первой степени) свойства рациональных чисел. Ведь для решения уравнений первой степени (или систем таких уравнений) нужно лишь уметь производить четыре арифметических действия: сложение, вычитание, умножение и деление (за исключением, конечно, деления на нуль), а в множестве всех рациональных чисел эти действия всегда выполнимы.

Множество чисел, в котором выполнимы все четыре арифметических действия (кроме деления на нуль), математики называют числовым полем. Таким образом, множество всех рациональных чисел является числовым полем. Напротив, множество всех целых положительных чисел числовым полем не является: в нем не всегда выполнимы вычитание и деление (например, действия $2-5$ и $3:7$ невозможно выполнить, зная лишь целые положительные числа). Для того чтобы вычитание всегда было выполнимо, нужно присоединить к целым положительным числам еще число «нуль» и все целые отрицательные числа. Тогда мы получим множество всех целых чисел. Но и оно не является числовым полем: хотя в нем всегда выполнимы сложение, вычитание и умножение, но не всегда выполнимо деление (например, действие $2:7$ невозможно выполнить, зная лишь целые числа). Присоединяя же к целым числам все дробные числа, мы получаем множество[1] всех рациональных чисел, которое уже является числовым полем.

НУЖНЫ НОВЫЕ ЧИСЛА

Не следует думать, что с построением поля рациональных чисел уже создано такое изобилие чисел, при котором каждому алгебраическому уравнению «достается» хотя бы один корень. Ведь, кроме уравнений первой степени, есть еще квадратные уравнения и уравнения высших степеней. Например, уравнение

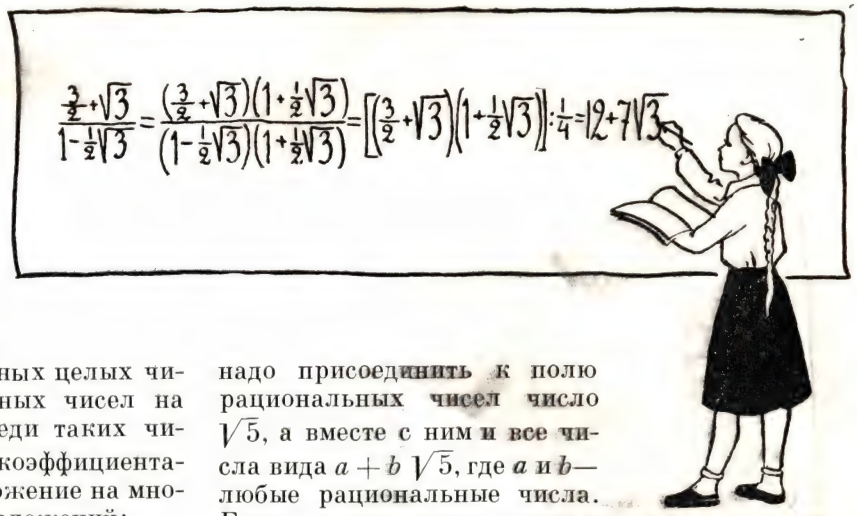
$$x^2-3=0 \qquad (2)$$

не имеет решений в поле рациональных чисел: нет такого рационального числа, квадрат которого равен трем. Если мы хотим, чтобы это уравнение имело решение, то мы должны присоединить к полю рациональных чисел такое число, квадрат которого равен трем. Оно обозначается через $\sqrt{3}$. Но, конечно, присоединение к полю рациональных чисел только одного нового числа $\sqrt{3}$ является не очень удачной операцией, так как после этого мы уже не получаем числового поля. Если мы хотим, чтобы у нас снова получилось числовое поле, то мы должны вместе с числом $\sqrt{3}$ присоединить к полю рациональных чисел и числа $2\sqrt{3}$, $\frac{1}{3}\sqrt{3}$, $-\frac{1}{3}\sqrt{3}$ и т. п., т. е. все числа вида $b\sqrt{3}$, где b — любое рациональное число (ведь в поле должно быть выполнимо умножение). Кроме того, мы должны присоединить и числа $1-\sqrt{3}$, $5+\frac{1}{3}\sqrt{3}$, $\frac{7}{11}+\frac{1}{5}\sqrt{3}$ и т. п., т. е. все числа вида $a+b\sqrt{3}$, где a и b — любые рациональные числа (ведь в поле должны быть выполнимы сложение и вычитание!). Интересно, что больше уже ничего присоединять и не нужно: *все числа вида $a+b\sqrt{3}$, где a и b — любые рациональные числа, образуют числовое поле*, т. е. в множестве всех таких чисел можно выполнять четыре арифметических действия. Например, деление сводится к освобождению от иррациональности в знаменателе:

$$\frac{\frac{3}{2}+\sqrt{3}}{1-\frac{1}{2}\sqrt{3}}=\frac{\left(\frac{3}{2}+\sqrt{3}\right)\left(1+\frac{1}{2}\sqrt{3}\right)}{\left(1-\frac{1}{2}\sqrt{3}\right)\left(1+\frac{1}{2}\sqrt{3}\right)}=$$

$$=\left[\left(\frac{3}{2}+\sqrt{3}\right)\left(1+\frac{1}{2}\sqrt{3}\right)\right]:\frac{1}{4}=12+7\sqrt{3}.$$

[1] Более подробно о том, что такое множество, вы узнаете из статьи «Понятие множества».



Поле чисел вида $a+b\sqrt{3}$ получилось из поля рациональных чисел присоединением к нему ряда новых чисел. Поэтому оно называется расширением поля рациональных чисел. Это поле обладает многими интересными свойствами. Если, например, рассматривать только «целые» числа вида $a+b\sqrt{3}$, т. е. числа, у которых коэффициенты a и b являются целыми, то можно (как и в множестве обычных целых чисел) искать разложение различных чисел на множители. Любопытно, что среди таких чисел (т. е. чисел $a+b\sqrt{3}$ с целыми коэффициентами a и b) единица допускает разложение на множители! Вот примеры таких разложений:

$$1=(2-\sqrt{3})(2+\sqrt{3}),\quad 1=(7-4\sqrt{3})(7+4\sqrt{3}).$$

Теперь становится понятным, что вопрос: «Имеет ли уравнение $x^2-3=0$ хотя бы один корень?» без указания, в каком поле мы хотим искать его корни, не имеет смысла. Если мы хотим искать корни в поле рациональных чисел, то ответ отрицательный: не существует рационального числа, квадрат которого был бы равен 3. А в поле чисел $a+b\sqrt{3}$ ответ положителен: уравнение $x^2-3=0$ имеет корни $x_1=\sqrt{3}$, $x_2=-\sqrt{3}$. Точно так же при ответе на вопрос: «Можно ли разложить данный многочлен на множители?» надо требовать указания, в каком поле разрешается брать коэффициенты многочленов. Например, в поле рациональных чисел многочлен x^2-3 на множители не разлагается, т. е. является неразложимым, или, как еще говорят, неприводимым. А в поле чисел вида $a+b\sqrt{3}$ этот же многочлен на множители разлагается:

$$x^2-3=(x-\sqrt{3})(x+\sqrt{3}).$$

УВЕЛИЧИТЬ ВДВОЕ ОБЪЕМ КУБА

Для получения поля чисел вида $a+b\sqrt{3}$ мы исходили из уравнения (2). Рассмотрим теперь другое квадратное уравнение:

$$x^2-5=0. \qquad (3)$$

Можно доказать, что не только в поле рациональных чисел, но и в поле чисел вида $a+b\sqrt{3}$ это уравнение не имеет корней. Для получения поля, в котором уравнение (3) имеет корни, надо присоединить к полю рациональных чисел число $\sqrt{5}$, а вместе с ним и все числа вида $a+b\sqrt{5}$, где a и b — любые рациональные числа. Если же мы хотим получить числовое поле, в котором имеет корни и уравнение (2) и уравнение (3), то следует присоединить к полю рациональных чисел оба числа $\sqrt{3}$, $\sqrt{5}$, а вместе с ними придется присоединить и все числа вида $a+b\sqrt{3}+c\sqrt{5}+d\sqrt{15}$, где a, b, c, d — любые рациональные числа. Пусть читатель самостоятельно проверит, что все числа такого вида действительно образуют числовое поле (т. е. что в множестве всех таких чисел выполнимы четыре арифметических действия).

Значительное расширение «запаса» чисел мы получим, рассматривая всевозможные числа, получающиеся из рациональных чисел с помощью четырех арифметических действий и извлечений квадратного корня. Получающиеся таким образом числа будем называть квадратичными иррациональностями. Среди них имеются такие числа, как например: $1+\sqrt{3}$, $2+\frac{2}{3}\sqrt{5}-\frac{1}{11}\sqrt{17}$, $\sqrt{1+\sqrt{2}}$, $\sqrt[4]{3}=\sqrt{\sqrt{3}}$, $\sqrt[4]{1+\sqrt[8]{\sqrt{3}+\sqrt{11}}}$ и т. п.

Все квадратичные иррациональности, вместе взятые, образуют числовое поле. Далее, если из любого положительного числа, являющегося квадратичной иррациональностью, извлечь квадратный корень, то мы снова получим квадратичную иррациональность. Из этого следует, что если мы возьмем любое квадратное уравнение, у которого коэффициентами являются квадратичные иррациональности, а дискриминант положителен (это нужно для того, чтобы корни этого квадратного уравнения были действительными числами), то корни этого урав-

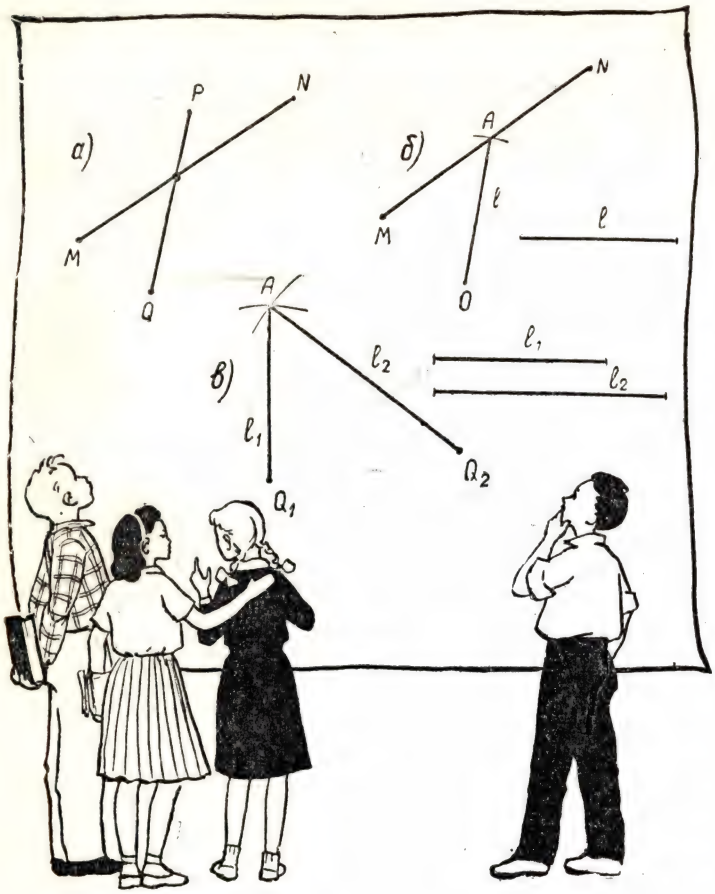


Рис. 1.

нения также будут квадратичными иррациональностями. Ведь при решении квадратных уравнений нужно лишь уметь выполнять арифметические действия и извлечение квадратных корней, а это все в поле квадратичных иррациональностей делать можно. Таким образом, в поле квадратичных иррациональностей можно не только выполнять арифметические действия (а значит, решать уравнения первой степени), но и решать квадратные уравнения (с положительным дискриминантом).

Поле квадратичных иррациональностей тесно связано с геометрическими построениями при помощи циркуля и линейки. В самом деле, допустим, что нам дан некоторый отрезок a и требуется, исходя из этого отрезка, провести циркулем и линейкой некоторое геометрическое построение. Например: построить правильный десятиугольник со стороной a или построить равносторонний треугольник, у которого медиана равна a, и т. д. Когда мы решаем циркулем и линейкой задачу на построение, то мы повторяем (в определенной последовательности) только т р и операции:

1) Уже построены некоторые четыре точки M, N, P, Q; найти точку пересечения прямых MN и PQ. Эта операция выполняется с помощью линейки (рис. 1, *а*).

2) Уже построены три точки M, N, O и отрезок l; найти на прямой MN такую точку A, что длина отрезка AO равна l. Эта операция выполняется с помощью линейки (проводится прямая MN) и циркуля (делается засечка с центром O, см. рис. 1, *б*).

3) Уже построены две точки Q_1, Q_2 и два отрезка l_1, l_2; построить точку A, расстояния которой от точек Q_1 и Q_2 соответственно равны l_1 и l_2. Эта операция выполняется с помощью циркуля (рис. 1, *в*).

Проводя эти операции, мы можем строить новые и новые точки, новые и новые отрезки, пока не построим фигуру, которая нам нужна. Несложные расчеты (с помощью теоремы Пифагора, формулы Герона и других теорем школьного курса геометрии) показывают, что все новые отрезки, которые возникают при выполнении любой из этих трех операций, имеют длины, выражающиеся через длины ранее имевшихся отрезков с помощью четырех арифметических действий и извлечения квадратных корней. Поэтому если длину первоначально заданного отрезка a принять за единицу, то в с е отрезки, которые мы можем построить с помощью циркуля и линейки, будут таковы, что длины их являются к в а д р а т и ч н ы м и и р р а ц и о н а л ь н о с т я м и. И наоборот, любой отрезок, длина которого выражается квадратичной иррациональностью, может быть построен с помощью циркуля и линейки. Поэтому с помощью вычислений можно заранее узнать, удастся или не удастся решить циркулем и линейкой данную задачу. Если расчеты покажут, что длины всех отрезков, которые нам нужно построить для решения задачи, являются квадратичными иррациональностями, то задачу можно решить с помощью циркуля и линейки. Но если расчеты покажут, что задача сводится к построению отрезка, длина которого н е я в л я е т с я квадратичной иррациональностью, то такую задачу решить циркулем и линейкой н е в о з м о ж н о.

Если, например, мы хотим построить правильный пятиугольник со стороной 1, то нам нужно для этого знать длину диагонали пятиугольника (тогда все вершины можно будет найти с помощью засечек). Расчеты показывают, что в таком пятиугольнике диагональ имеет длину $\frac{1+\sqrt{5}}{2}$. Так как это число является квадратичной иррациональностью, то построение правильного пятиугольника с помощью циркуля и линейки возможно. Великий немецкий математик Гаусс (1777—1855) доказал, что если p — простое число, то правильный p-угольник с данной стороной a может быть построен циркулем и линейкой лишь в том случае, когда число p можно записать в виде

$$p=2^{2^n}+1.$$

Например, $17=2^{2^2}+1$, поэтому правильный семнадцатиугольник может быть построен циркулем и линейкой. Построение же, например, правильного одиннадцатиугольника невозможно с помощью циркуля и линейки.

В древности математики потратили много сил на решение следующей задачи: дан куб с ребром a; построить такой куб, объем которого в д в о е больше объема данного куба. Подсчитаем, какой отрезок надо построить для решения этой задачи. Примем длину отрезка a за единицу, а длину ребра искомого куба обозначим через x. Тогда объем данного куба будет равен единице, а объем искомого куба будет равен x^3. По условию задачи должно быть

$$x^3=2,$$

откуда $x=\sqrt[3]{2}$. Число $\sqrt[3]{2}$ не является квадратичной иррациональностью, и потому *задача об удвоении куба с помощью циркуля и линейки решена быть не может.*

АЛГЕБРАИЧЕСКИЕ И НЕАЛГЕБРАИЧЕСКИЕ (ТРАНСЦЕНДЕНТНЫЕ) ЧИСЛА

До сих пор мы интересовались решением уравнений первой степени и квадратных уравнений. Что же будет, если мы будем брать уравнения любых степеней? Если присоединить к полю рациональных чисел все действительные числа, являющиеся корнями всевозможных алгебраических уравнений (любой степени) с целыми коэффициентами, то мы получим новое расширение поля рациональных чисел. Числа, входящие в это поле, называются а л г е б р а и ч е с к и м и ч и с л а м и. В частности, все квадратичные иррациональности (и вообще все действительные числа, выражающиеся с помощью радикалов, например $\sqrt[3]{2}$) являются алгебраическими числами.

Однако, даже взяв поле алгебраических чисел, мы еще не получаем в с е х действительных чисел, т. е. всех чисел, которые мы изображаем в виде точек на числовой оси. Даже более того, среди действительных чисел гораздо б о л ь ш е неалгебраических чисел, чем алгебраических (хотя и тех и других бесконечно много). Образно говоря, если мы «покрасим» числовую прямую белой краской, а затем черной краской нанесем точки, которые соответствуют алгебраическим числам, то на прямой еще останутся «просветы» (не окрашенные в черный цвет точки), причем эти просветы можно будет найти всюду, на любом отрезочке, каким бы маленьким он ни был.

Числа, не являющиеся алгебраическими, называются также т р а н с ц е н д е н т н ы м и. Немецкий математик Линдеман доказал в 1882 г., что число π трансцендентно, т. е. не является корнем никакого алгебраического уравнения с целыми коэффициентами. Советский математик А. О. Гельфонд доказал, что если a и b — положительные алгебраические числа, то число $\log_a b$ либо рационально, либо же, в противном случае, обязательно трансцендентно. Например, числа $\log_2 3$, $\log_{10} 5$, $\log_{10} 27$ и т. п. трансцендентны. Вообще десятичные логарифмы всех рациональных чисел, кроме чисел 1, 10, 100, 1000,..., $\frac{1}{10}$, $\frac{1}{100}$, $\frac{1}{1000}$,..., трансцендентны.

Множество в с е х действительных чисел также является числовым полем — ведь действительные числа (изображаемые точками на числовой оси) можно складывать и вычитать, умножать и делить.

ПОЛНОЕ ИЗОБИЛИЕ ЧИСЕЛ

Даже всех действительных чисел недостаточно для того, чтобы можно было решить любое алгебраическое уравнение с целыми коэффициентами. Например, уравнение

$$x^2+1=0 \qquad (4)$$

не имеет корней в поле действительных чисел: ведь это уравнение может быть записано в виде $x^2=-1$, а квадрат любого действительного числа (положительного или отрицательного) есть число н е о т р и ц а т е л ь н о е. Для того чтобы решить уравнение (4), надо присоединить к полю действительных чисел новое («мнимое») число $\sqrt{-1}$. Вместе с этим новым числом $\sqrt{-1}$ нужно, конечно, присоединить и все числа вида

$a+b\sqrt{-1}$, где a и b — любые действительные числа (если $b=0$, то число $a+0\cdot\sqrt{-1}$ считается совпадающим с действительным числом a). Числа вида $a+b\sqrt{-1}$ называются комплексными. Их можно складывать, вычитать и умножать по обычным правилам (как многочлены). Деление выполняется с помощью умножения числителя и знаменателя на сопряженное число:

$$\frac{2+\sqrt{-1}}{3-\sqrt{-1}}=\frac{(2+\sqrt{-1})(3+\sqrt{-1})}{(3-\sqrt{-1})(3+\sqrt{-1})}=$$
$$=\frac{5+5\sqrt{-1}}{3^2-(\sqrt{-1})^2}=\frac{1}{2}+\frac{1}{2}\sqrt{-1}.$$

Таким образом, с комплексными числами можно производить все арифметические действия, т. е. *комплексные числа образуют поле.* Поле комплексных чисел является расширением поля действительных чисел, причем в этом расширенном поле уравнение (4) уже имеет корни:

$$x_1=\sqrt{-1},\ x_2=-\sqrt{-1}.$$

Замечательным свойством поля комплексных чисел является то, что оно алгебраически замкнуто. Это означает, что *любое алгебраическое уравнение (произвольной степени) с действительными или комплексными коэффициентами имеет корни в поле комплексных чисел.* Это — знаменитая «основная теорема алгебры», первое (но неполное) доказательство которой было дано французским математиком д'Аламбером (в середине XVIII в.) и которая была впервые со всей строгостью доказана Гауссом в 1799 г. Из этой теоремы вытекает, что любой многочлен относительно x с комплексными (в частности, с действительными) коэффициентами может быть разложен на множители первой степени (с комплексными коэффициентами). Например:

$$x^2+1=(x+\sqrt{-1})(x-\sqrt{-1}).$$

Тот факт, что поле действительных чисел не является алгебраически замкнутым, а становится таковым лишь после присоединения комплексных чисел, показывает, что введение в математику комплексных чисел не было случайным, не было досужей выдумкой, а явилось закономерным продуктом развития теории алгебраических уравнений. В настоящее время комплексные числа широко применяются не только при решении уравнений, но и в ряде других разделов математики, а также в электротехнике, аэродинамике и т. д.

ВМЕСТО ЧЕТЫРЕХ ДЕЙСТВИЙ — ТРИ

Арифметические действия в алгебре выполняются не только над числами, но и над буквенными выражениями, например над многочленами. Будем рассматривать только многочлены от одной буквы x с действительными коэффициентами, например x^2-5, x^3+2x^2-x, $\frac{1}{4}x^4+\sqrt{2}$ и т. д.[1] Такие многочлены можно складывать, вычитать и умножать, причем в результате опять будут получаться многочлены. Деление же многочлена на многочлен не всегда возможно без остатка. Например, многочлен x^2+3 не делится без остатка на $x+1$ (т. е. нет такого многочлена, при умножении которого на $x+1$ мы получили бы многочлен x^2+3). Таким образом, в множестве всех многочленов всегда выполнимы три действия: сложение, вычитание и умножение, а четвертое действие (деление) не всегда выполнимо. Заметим, что законы действий, которые выполняются над многочленами, точно такие же, как и законы действий с числами. Например, распределительный закон

$$(a+b)c=ac+bc$$

справедлив и для чисел, и для многочленов. То же можно сказать о переместительных законах:

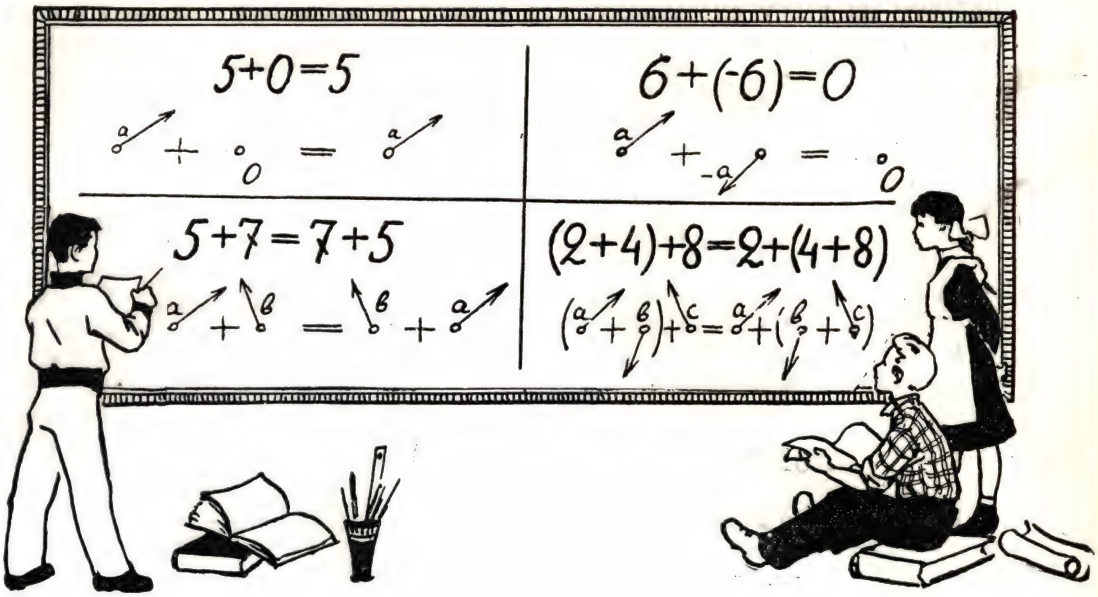
$$ab=ba,\quad a+b=b+a,$$

о правилах раскрытия скобок и т. д. Множество некоторых математических объектов (например, чисел или многочленов), в котором выполнимы три действия: сложение, вычитание и умножение, подчиняющиеся обычным законам (распределительному, переместительному и др.), называется кольцом. Таким образом, множество всех многочленов относительно буквы x представляет собой кольцо («кольцо многочленов»).

Разумеется, всякое числовое поле является также и кольцом: ведь в нем сложение, вычитание и умножение всегда выполнимы (и, кроме того, выполнимо деление). Однако кольцо не всегда является полем, так как в кольце деление может оказаться не всегда выполнимым. Примером кольца, которое не является полем (т. е. кольца, в котором не всегда выполнимо деление), как раз и является кольцо многочленов. Другим примером кольца (также не являющегося

[1] Каждое число также следует рассматривать как многочлен (многочлен нулевой степени, т. е. многочлен, совсем не содержащий буквы x).

полем) может служить множество всех целых чисел: в нем выполнимы сложение, вычитание и умножение, но деление выполнимо не всегда. Все четные числа также образуют кольцо, так как сумма, разность и произведение четных чисел снова являются четными числами. В противоположность этому множество всех нечетных чисел кольца не образует, так как в нем невыполнимы сложение и вычитание (ведь сумма двух нечетных чисел уже не является нечетным числом).



НАД ЧЕМ МОЖНО ПРОИЗВОДИТЬ ДЕЙСТВИЯ

Выполняя сложение, вычитание и умножение многочленов, мы впервые замечаем, что алгебраические действия можно выполнять не только над числами, но и над некоторыми другими математическими объектами (многочленами). В наше время мысль о том, что алгебраические действия можно производить не только над числами, но и над другими объектами, не является такой уж невероятной даже для учащихся. Например, в статье «Геометрическая алгебра» вы можете прочесть о сложении и вычитании векторов; в статье «Необыкновенная арифметика» — о сложении, вычитании и умножении вычетов; в статье «Понятие о геометрическом отображении» — о сложении преобразований.

Что же общего между совершенно различными на первый взгляд операциями, которые мы называем одним и тем же термином «сложение» (сложение чисел, сложение векторов, сложение преобразований)? Разумеется, в счет не идет то обстоятельство, что у этих операций общее название; ведь название можно дать какое-либо другое; например, сумму двух векторов можно было бы назвать их равнодействующей (это название применяется в механике в случае двух сил, приложенных к одной точке). *Общим у всех этих операций является то, что по своим свойствам они напоминают обычное сложение чисел.*

Вспомним, например, сложение векторов, подробно рассмотренное на стр. 175—178 настоящего тома. Как мы знаем, оно ассоциативно (сочетательно), т. е. для любых трех векторов $\boldsymbol{a}$, $\boldsymbol{b}$, $\boldsymbol{c}$ выполняется соотношение

$$\boldsymbol{a}+(\boldsymbol{b}+\boldsymbol{c})=(\boldsymbol{a}+\boldsymbol{b})+\boldsymbol{c}.$$

Это свойство делает сложение векторов родственным сложению чисел. Далее, среди векторов, так же как и среди чисел, существует нуль (нулевой вектор), обладающий тем свойством, что для любого вектора $\boldsymbol{a}$ выполнено соотношение

$$\boldsymbol{a}+\boldsymbol{0}=\boldsymbol{a}.$$

Как и в случае чисел, для каждого вектора $\boldsymbol{a}$ существует противоположный вектор, обозначаемый $-\boldsymbol{a}$ и обладающий тем свойством, что

$$\boldsymbol{a}+(-\boldsymbol{a})=\boldsymbol{0}.$$

Это дает возможность определить вычитание векторов, а именно разность $\boldsymbol{a}-\boldsymbol{b}$ определяется как вектор $\boldsymbol{a}+(-\boldsymbol{b})$. Все свойства равенств, известные для чисел, сохраняются также и для векторов. Например, можно переносить члены из одной части равенства в другую, меняя стоящие перед этими членами знаки на обратные. Отсюда следует, что для любых двух векторов $\boldsymbol{a}$ и $\boldsymbol{b}$ уравнение

$$\boldsymbol{x}+\boldsymbol{b}=\boldsymbol{a}$$

имеет одно решение, а именно

$$\boldsymbol{x}=\boldsymbol{a}-\boldsymbol{b},$$

Добавим ко всему сказанному, что сложение векторов коммутативно (переместительно):

$$\boldsymbol{a}+\boldsymbol{b}=\boldsymbol{b}+\boldsymbol{a},$$

и нам станет ясно, что сложение векторов и сложение чисел действительно имеют много общего.

Точно так же можно было бы указать много свойств, общих для сложения чисел и сложения геометрических преобразований, для сложения чисел и сложения вычетов и т. п. Существует еще очень много примеров таких математических объектов, «сложение» которых обладает аналогичными свойствами.

ПОНЯТИЕ ГРУППЫ

Все сказанное подводит нас к важному математическому понятию — понятию группы. Некоторые математические объекты (скажем, векторы) образуют группу, если для этих объектов определены два взаимно-обратных действия (называемые обычно «сложением» и «вычитанием»), свойства которых напоминают нам свойства сложения и вычитания чисел. Более точное определение группы будет сформулировано ниже.

Какая же польза от того, что сходные (правилами действия) объекты мы называем одним и тем же термином «группа»? Дело в том, что если мы докажем какую-либо теорему о группах вообще (т. е. теорему, справедливую для любой группы), то эта теорема будет применима к любому из рассмотренных выше случаев (числа, вычеты, геометрические преобразования, векторы) и к ряду других случаев, которые мы не рассматривали. Например, правила сложения и вычитания многочленов, правило знаков при раскрытии скобок и т. д. можно доказать сразу для всех этих случаев, не проводя отдельных доказательств для случая векторов, для случая геометрических преобразований, для случая вычетов и т. п. Иначе говоря, каждая общая теорема о группах дает возможность сразу же получить и некоторое свойство чисел, и свойство векторов, и свойство геометрических преобразований и т. п. До некоторой степени это можно проиллюстрировать на примере решения квадратных уравнений: знание общей формулы решения позволяет решать целый ряд квадратных уравнений с числовыми коэффициентами. Так и здесь: развитие одной общей математической теории — теории групп — позволяет получать важные результаты в ряде вопросов математики: в геометрии (векторы, геометрические преобразования и т. п.), в теории чисел, алгебре и т. д., а также в некоторых разделах современной физики.

Сформулируем теперь точное определение понятия группы. Прежде всего группа представляет собой множество (см. статью «Понятие множества») каких-либо элементов, например множество всех чисел или множество всех векторов, всех геометрических преобразований и т. д. Далее, для элементов, из которых это множество состоит (скажем, для векторов), определена некоторая операция (т. е. некоторое действие), называемая «сложением» и относящая каждым двум элементам a и b рассматриваемого множества третий элемент того же множества — их «сумму» $a+b$. Если эта операция обладает определенными свойствами (напоминающими нам сложение чисел), то рассматриваемое множество элементов, в котором определена эта операция, и называется группой.

Какие же свойства требуются от операции сложения для того, чтобы мы могли утверждать, что рассматриваемое множество является группой? Прежде всего следует сказать, что сложение не предполагается коммутативным: не требуется, чтобы для любых двух элементов a и b было выполнено соотношение

$$a+b=b+a,$$

так что суммы $a+b$ и $b+a$ могут не совпадать друг с другом. Что же требуется от операции сложения? Требуется выполнение следующих трех свойств:

1°. В рассматриваемом множестве имеется нулевой элемент, обозначаемый символом 0, прибавление которого к любому элементу a не меняет этого элемента [1]:

$$a+0=a, \quad 0+a=a.$$

2°. Для любого элемента a имеется противоположный элемент $-a$, который в сумме с элементом a дает нулевой элемент:

$$a+(-a)=0, \ (-a)+a=0.$$

3°. Сложение ассоциативно, т. е. для любых трех элементов a, b, c справедливо соотношение

$$(a+b)+c=a+(b+c).$$

[1] Если сложение коммутативно, то $a+0$ и $0+a$ — один и тот же элемент, так что вместо двух равенств $a+0=a$, $0+a=a$ можно написать лишь одно (любое). Если же сложение не обладает свойством коммутативности, то следует указывать оба эти равенства.

Итак, группой называется такое множество, в котором определена операция, обладающая перечисленными свойствами 1°—3°. Если, кроме того, эта операция обладает свойством коммутативности, т. е. для любых элементов a и b выполнено соотношение $a+b=b+a$, то рассматриваемая группа называется коммутативной. Для того чтобы задать группу, недостаточно указать все элементы, из которых она состоит; надо указать еще ту операцию, рассмотрение которой превращает это множество в группу. Ведь если в одном и том же множестве по-разному ввести операцию сложения, мы получим разные группы, хотя и состоящие из одних и тех же элементов.

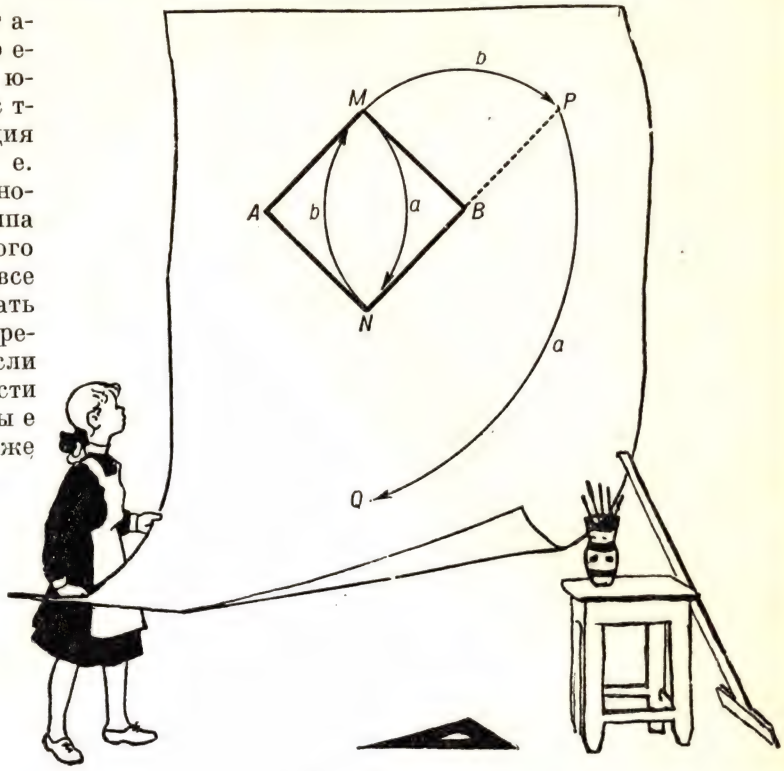


Рис. 2.

ПРИМЕРЫ ГРУПП

Самые простые примеры групп уже приводились. Если мы рассмотрим множество всех действительных чисел и обычную операцию сложения, то получим группу (ибо все свойства 1°—3° для чисел, как известно, выполнены). Эта группа — ее называют числовой прямой или числовым континуумом,— очевидно, коммутативна.

Множество всех векторов на плоскости или векторов в пространстве с обычной операцией сложения (по правилу параллелограмма) является группой, причем группой также коммутативной. Первая из этих двух групп (векторы на плоскости) называется двумерной векторной группой, а вторая (векторы в пространстве) — трехмерной векторной группой.

Группа может содержать и конечное число элементов. Примером служит группа вычетов по модулю m, состоящая из остатков от деления на m с обычным их сложением (см. статью «Необыкновенная арифметика»). Такая группа (очевидно, коммутативная) содержит m элементов. Например, группа вычетов по модулю 3 состоит из трех элементов: 0, 1, 2, а группа вычетов по модулю 10 — из десяти элементов: 0, 1, ..., 9.

Наконец, все параллельные переносы и все повороты плоскости также образуют группу— она называется группой движений плоскости. Нулевым элементом этой группы является тождественное преобразование плоскости, т. е. такое «преобразование», в результате которого все точки плоскости остаются на месте (это преобразование можно назвать «поворотом на нулевой угол» или «параллельным переносом на нулевой отрезок»). Противоположным элементом для некоторого поворота является поворот в противоположном направлении на тот же угол; противоположным элементом для некоторого параллельного переноса является перенос в противоположном направлении на тот же отрезок.

Интересно отметить, что группа движений плоскости некоммутативна. В самом деле, рассмотрим в плоскости некоторый квадрат $AMBN$ (рис. 2) и обозначим через a поворот плоскости на 90° по часовой стрелке вокруг точки A, а через b — поворот плоскости на 90° по часовой стрелке вокруг точки B. Покажем, что сумма движений a и b зависит от того, в каком порядке берутся слагаемые, т. е. что $a+b\neq b+a$. Движение a переводит точку M в положение N; совершив затем движение b, мы переведем точку N в положение M. Таким образом, движение $a+b$ (сначала a, затем b) переводит точку M снова в точку M. Выполним теперь движение $b+a$ (сначала b, затем a). Точка, в которую переводится M движением b, обозначена на рис. 2 буквой P; движение a переводит точку P в точку Q. Таким об-

разом, движение $a+b$ переводит точку M снова в точку M, а движение $b+a$ переводит точку M в другую точку — Q, и потому $a+b$ и $b+a$ — разные движения.

Еще один простой пример группы мы получим, рассматривая все целые числа (положительные, отрицательные и нуль) с обычной операцией сложения. Заметим, что числа 0,1, 2, 3,... (целые неотрицательные числа), рассматриваемые с обычной операцией сложения, группы не образуют: это множество не обладает свойством 2°, в нем нет противоположных элементов для положительных чисел.

Простой, но на первый взгляд несколько странный пример группы мы получим, если рассмотрим множество всех положительных действительных чисел, а в качестве «сложения» возьмем обычное умножение чисел — ведь дело не в названии операции (сложение или умножение), лишь бы были выполнены свойства 1°—3°, которые определяют группу. А свойства эти здесь действительно выполнены. Роль «нулевого элемента» играет число 1:

$$a\cdot 1=a, \qquad 1\cdot a=a.$$

(Мы обозначаем операцию точкой, как обычное умножение, хотя называть ее будем «сложением».) Противоположным элементом для положительного числа a является число $\frac{1}{a}$:

$$a\cdot\frac{1}{a}=1;\ \frac{1}{a}\cdot a=1.$$

Кроме того, это «сложение» (т. е. обычное умножение чисел), как известно, ассоциативно:

$$(a\cdot b)\cdot c=a\cdot(b\cdot c).$$

Таким образом, мы действительно имеем группу. Этот пример показывает большое сходство между операциями сложения и умножения. Исторически долгое время любую операцию в группе со свойствами 1°—3° называли «умножением», но в последние годы более распространенным стало название «сложение» для групповой операции. Это еще раз показывает, что дело здесь не в названии, а в тех свойствах, которыми обладает рассматриваемая операция.

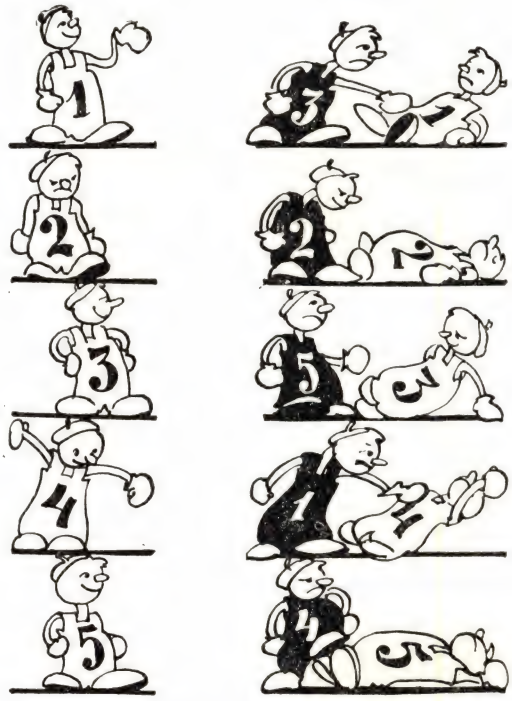
ГРУППЫ ПОДСТАНОВОК

Понятие группы возникло в XVIII в. при исследовании уравнений высших степеней в связи с рассмотрением так называемых подстановок, важная роль которых была установлена французским математиком Лагранжем. Пусть имеется n каких-либо предметов A_1, A_2, ..., A_n (такими «предметами» были в первоначальных исследованиях корни уравнений n-й степени). Подстановкой называется замена предметов A_1, A_2, ..., A_n этими же предметами, но в ином порядке. Например, если предмет A_1 заменяется предметом A_3, A_2 заменяется на A_1, а A_3 заменяется предметом A_2, то мы имеем подстановку предметов A_1, A_2, A_3. Эта подстановка записывается в виде

$$\begin{pmatrix}1 & 2 & 3\\ 3 & 1 & 2\end{pmatrix}.$$

В верхней строке указываются номера первоначально взятых предметов, а в нижней — номера тех предметов, которыми они заменяются. Аналогичная запись применяется и для обозначения подстановок любого числа предметов. Например, запись

$$\begin{pmatrix}1 & 2 & 3 & 4\\ 4 & 3 & 1 & 2\end{pmatrix}$$



означает, что предметы A_1, A_2, A_3, A_4 заменены соответственно предметами A_4, A_3, A_1, A_2.

Выполнение подстановок одну за другой называют умножением подстановок. Если, например, первая подстановка переводит предмет A_1 в предмет A_3, а вторая подстановка предмет A_3 заменяет предметом A_4, то произведение этих двух подстановок будет сразу заменять предмет A_1 предметом A_4. Конечно, пере-

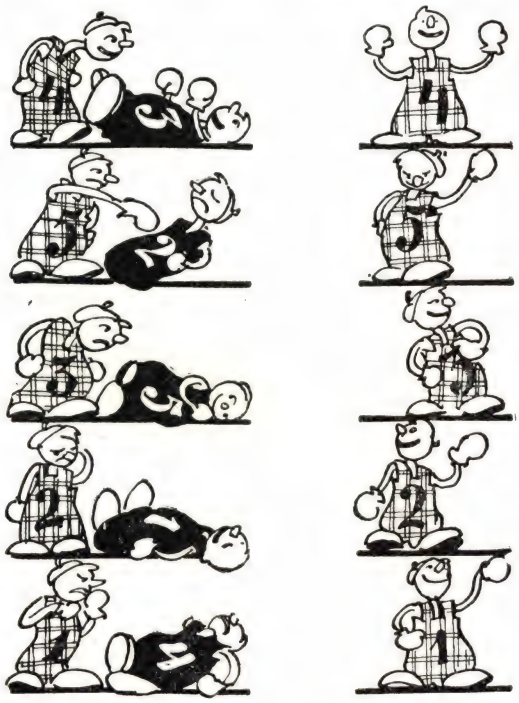
множать можно только такие подстановки, которые производятся над одними и теми же предметами. Вот пример умножения подстановок:

$$\begin{pmatrix}1&2&3&4&5\\3&2&5&1&4\end{pmatrix}\cdot\begin{pmatrix}1&2&3&4&5\\2&5&4&1&3\end{pmatrix}=\begin{pmatrix}1&2&3&4&5\\4&5&3&2&1\end{pmatrix}.$$

Все подстановки одних и тех же предметов, например предметов A_1, A_2, A_3, A_4, A_5, образуют группу относительно указанной операции умножения[1] подстановок. Единицей является подстановка, оставляющая все предметы на месте:

$$\begin{pmatrix}1&2&3&4&5\\1&2&3&4&5\end{pmatrix}.$$

Обратная подстановка определяется столь же просто: если некоторая подстановка переводит предмет A_1 в предмет A_3, то обратная подстановка, наоборот, заменяет предмет A_3 предметом



A_1. Вот, например, две подстановки, из которых одна является обратной для другой:

$$\begin{pmatrix}1&2&3&4&5\\3&2&5&1&4\end{pmatrix},\ \begin{pmatrix}1&2&3&4&5\\4&2&1&5&3\end{pmatrix}.$$

[1] Рассмотренную операцию в группе подстановок можно было бы называть и сложением, но ранее возникшее название «умножение» так и осталось для этой операции. Но дело, конечно, не в названии. Обратите внимание на попытку художника шуточно представить смысл этой операции в виде соревнования крохотных боксеров.

Итак, подстановки некоторого числа предметов (например, предметов $A_1, A_2, \ldots, A_n$) образуют группу.

* * *

Возникновение теории групп связано в первую очередь с именем Галуа — замечательного французского математика, погибшего[1] в 1832 г. в возрасте 21 года. Несмотря на то, что жизнь его была столь короткой, Галуа оставил очень глубокий след в науке. Основные исследования Галуа относятся к современной алгебре, один из разделов которой носит сейчас название теории Галуа. В своих сочинениях Галуа заложил основы теории алгебраических уравнений и теории расширения полей. Он рассматривает различные группы и поля, в первую очередь группы подстановок. Галуа получил с помощью групп ряд замечательных результатов в области решения уравнений высших степеней.

Работы Галуа долгое время не получали признания, хотя некоторые из них были напечатаны еще при его жизни. Лишь спустя 14 лет после смерти Галуа французский математик Лиувилль разобрал и опубликовал все его работы. В 70-х годах XIX в. идеи и методы Галуа получили широкое распространение. Примерно к этому времени и относится быстрое развитие общей теории групп (Жордан, Бёрнсайд и другие математики), которая не только оказала существенное влияние на всю математику, но и нашла впоследствии важные применения в некоторых разделах физики (например, в квантовой механике, в кристаллографии) и в других науках. Понятие группы применяется почти во всех разделах математики. В развитие теории групп большой вклад внесли русские и советские ученые.

[1] Галуа активно выступал против королевского режима, участвовал в обществе «Друзей народа», дважды сидел в тюрьме за свою политическую деятельность. Убит на дуэли, которая, по-видимому, была специально подстроена роялистами.

НЕОБЫКНОВЕННАЯ АРИФМЕТИКА

АРИФМЕТИКА ОСТАТКОВ

Какой счетный механизм умеет считать только до 1000? Наш домашний электросчетчик. Израсходованную электрическую энергию он считает в киловатт-часах (*квт-ч*). Взгляните на рисунок. Счетчик показывает число 905,73. Это значит, что начиная с того момента, когда счетчик показывал число 0, израсходовано 905,73 *квт-ч* электроэнергии. Пройдет еще некоторое время, и счетчик покажет 999,99 *квт-ч*. А 1000 *квт-ч* наш домашний электросчетчик показать не может; вместо 1000 он снова покажет 0 — такова его конструкция.

Допустим, что сейчас в окошечках счетчика появилось число 016,09, а месяц назад на этом счетчике было число 880,12. Отбросим десятые и сотые в каждом числе и поставим вопрос: сколько электроэнергии израсходовано за месяц?

Зная особенность конструкции электросчетчика, мы, конечно, считаем так: 1016—880= =136 (*квт-ч*). Но сам счетчик не умеет считать дальше тысячи; если бы и мы не умели, то у нас получилась бы несколько необычная арифметика:
016—880=136, или 880+136=16.

Можно сказать и так: в действительности счетчик производит сложение (например, к 880 прибавляет 136), но показывает нам в своих окошечках лишь последние три цифры суммы (десятые и сотые мы в расчет не принимаем), даже если сумма больше тысячи. Это означает, что, прибавляя к числу, показанному счетчиком в прошлом месяце, число, выражающее расход электроэнергии за последний месяц, счетчик показывает не самую сумму, а остаток от деления этой суммы на 1000. Зная, что несколько лет назад, в момент установки счетчика, на нем было показание 000, а сейчас он показывает 016, вы не сможете установить, сколько электроэнергии было израсходовано за все это время. Вы только сможете сказать, что было израсходовано 16 *квт-ч* и еще какое-то целое число тысяч киловатт-часов, но сколько именно тысяч — неизвестно.

Счетчик может и умножать. Вообразим, что некто зажигает свет и гасит его ежедневно в одни и те же часы, так что каждый месяц расходуется одно и то же количество электроэнергии, например 136 *квт-ч*. Каков будет расход электроэнергии за год? Очевидно, что ответ будет таков: 136 *квт-ч* × 12=1632 *квт-ч*. Но счетчик ответит нам на этот вопрос по-другому. Если например, в начале года показание счетчика было 016, то в конце года, после израсходования еще 1632 *квт-ч* электроэнергии, показание счетчика будет не 1648, а 648, так что показание счетчика увеличилось лишь на 632. С «точки зрения» счетчика умножение выполняется так:

$$136 \cdot 12 = 632.$$

И здесь счетчик дает нам не само произведение (т. е. 1632), а лишь остаток от деления его на 1000, т. е. число 632.

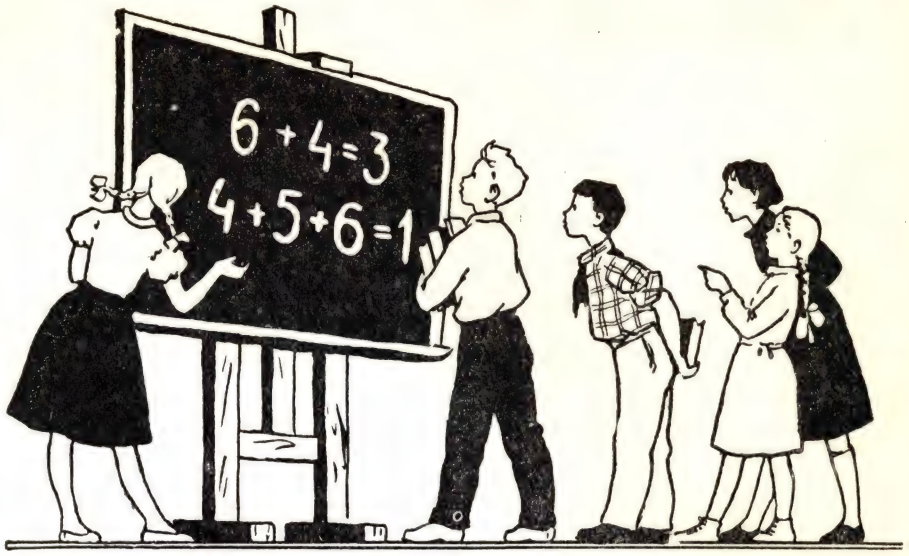
Итак, арифметика счетчика — это арифметика остатков от деления на 1000. В этой арифметике только 999 целых чисел и нуль; сумма и произведение здесь никогда не превышают 999, а при вычитании никогда не будет отрицательных чисел.

Удобнее познакомиться с такой арифметикой, беря остаток от деления на меньшее число, чем 1000. Пусть, например, некоторый механизм считает так: 0, 1, 2, 3, 4, 5, 6 и далее опять 0 (вместо числа 7), 1 (вместо числа 8), 2 (вместо числа 9), и т. д., т. е. вместо каждого числа механизм показывает остаток от деления этого числа на 7.

Тогда при сложении чисел 6 и 5 получится не 11, а 4. Так и запишем: 6+5=4. Аналогично: 4+3=0. Далее, 5·6=2, так как 2 это и есть остаток от деления числа 30 на 7. Наконец, умея складывать и умножать, мы можем попытаться выполнять и обратные действия — вычитание и деление. Например, 1—5=3 (так как 3+5=1); 5 : 3=4 (так как 3·4=5).

В такой арифметике, которую можно назвать «арифметикой остатков от деления на 7», имеется конечное множество чисел — всего 7. Эти

семь чисел (т. е. остатки от деления на 7, над которыми действия выполняются так, как это было объяснено выше) называются вычетами по модулю 7. Показания счетчика (если отбросить в них десятые и сотые доли) также являются вычетами (т. е. остатками), но уже по модулю 1000. Конечно, можно рассматривать вычеты и по другим модулям; например, показания минутной стрелки часов являются вычетами по модулю 60 (ведь через каждые 60 минут минутная стрелка начинает отсчитывать минуты заново: одна, две,...).



Чтобы не смешивать обычное равенство чисел с равенством остатков от деления двух чисел на какое-либо число, последнее, как правило, записывают так: $a \equiv b \pmod{m}$ (читают: a сравнимо с b по модулю m, т. е. a и b при делении на m дают одни и те же остатки). В наших примерах следовало бы записать так:

$6+5 \equiv 4 \pmod{7}$ или $5 \cdot 6 \equiv 2 \pmod{7}$.

В настоящей статье мы этого правила придерживаться не будем.

Вернемся снова к вычетам по модулю 7. Как мы видели, сложение и умножение вычетов производится очень легко: надо их сложить или перемножить, как обычные числа, после чего взять не сам полученный результат, а его остаток от деления на 7. Подсчитывая всевозможные суммы и произведения вычетов, можно составить «таблицу сложения» и «таблицу умножения». Вот эти таблицы для вычетов по модулю 7.

Таблица сложения

+	0	1	2	3	4	5	6
0	0	1	2	3	4	5	6
1	1	2	3	4	5	6	0
2	2	3	4	5	6	0	1
3	3	4	5	6	0	1	2
4	4	5	6	0	1	2	3
5	5	6	0	1	2	3	4
6	6	0	1	2	3	4	5

Таблица умножения

×	0	1	2	3	4	5	6
0	0	0	0	0	0	0	0
1	0	1	2	3	4	5	6
2	0	2	4	6	1	3	5
3	0	3	6	2	5	1	4
4	0	4	1	5	2	6	3
5	0	5	3	1	6	4	2
6	0	6	5	4	3	2	1

В этих таблицах верхняя строка чисел и левый столбец (они отделены линейками) служат для выбора слагаемых или сомножителей, а вся остальная часть таблицы — для нахождения суммы или произведения взятых чисел.

Например, для нахождения произведения $4 \cdot 5$ мы берем в таблице умножения строку, в которой стоит сомножитель 4, и столбец, в котором стоит сомножитель 5. На пересечении взятых строки и столбца находим искомое произведение:

$$4 \cdot 5 = 6.$$

Указанные таблицы можно использовать также для вычитания и деления вычетов. Пусть, например, мы хотим найти частное 5:2. Иначе говоря, мы хотим найти такой вычет x, что $2 \cdot x = 5$. Ясно, что нам нужно для этого взять ту строку таблицы умножения, которая соот-

ветствует множимому 2, и найти, где в этой строке стоит произведение 5:

×							6
2	0	2	4	6	1	3	5

После этого остается посмотреть на верхнюю строку, чтобы увидеть тот множитель x, для которого произведение $2 \cdot x$ равно 5. Этим множителем будет число 6, т. е. $2 \cdot 6 = 5$; отсюда $5:2=6$. Заметьте, что в выписанной строке таблицы умножения (соответствующей множимому 2) встречаются по одному разу все вычеты (от 0 до 6). Это означает, что любой вычет может быть разделен на 2. Тем же свойством обладает и любая другая строка таблицы умножения, кроме, конечно, строки, соответствующей множимому 0. Отсюда вывод: в арифметике вычетов по модулю 7 деление всегда выполнимо, за исключением случая, когда делитель равен нулю. Иначе говоря, в этой арифметике не существует дробных чисел.

Так будет и для вычетов по модулю 5, и для вычетов по модулю 13, и вообще для вычетов по простому модулю. Если же модуль, по которому берутся вычеты, не является простым числом, то деление не всегда возможно. Например, в арифметике вычетов по модулю 10 деление $1:5$ невыполнимо. Ведь при умножении на 5 получается либо 0, либо 5. Таким образом, для любого вычета x по модулю 10 имеет место либо равенство $5 \cdot x = 0$, либо равенство $5 \cdot x = 5$, и потому уравнение $5 \cdot x = 1$ неразрешимо (т. е. не имеет корней).

МОЖНО ЛИ ПЕРЕРЕШАТЬ ВСЕ КВАДРАТНЫЕ УРАВНЕНИЯ

Будем рассматривать только такие квадратные уравнения $ax^2+bx+c=0$, у которых коэффициенты a, b, c являются всевозможными вычетами по модулю 5, причем $a \neq 0$, так как при $a=0$ уравнение перестанет быть квадратным.

При этих ограничениях, наложенных на коэффициенты a, b и c, не так уж велико будет разнообразие возможных квадратных уравнений. Если их написать в тетради, то они все уместятся на одной странице и, следовательно, каждый смело может заявить в этом случае, что он берется перерешать все такие квадратные уравнения.

Решая любое такое уравнение, надо помнить, что корнями его могут быть также только вычеты по модулю 5, т. е. 0, 1, 2, 3, 4. Какие из них удовлетворяют какому-либо уравнению, нетрудно определить простой пробой (подставляя их поочередно вместо x в данное уравнение).

Можно поступить и так: дополнить левую часть уравнения до полного квадрата. Если, например, дано уравнение $x^2+x+3=0$, то, прибавив по 1, получим $x^2+x+4=1$, или $x^2+2 \cdot 3x+3^2=1$, или, наконец, $(x+3)^2=1$. Рассмотрим таблицу квадратов (по модулю 5):

$$0^2=0;\ 1^2=1;\ 2^2=4;\ 3^2=4;\ 4^2=1.$$

Очевидно теперь, что правая часть уравнения $(x+3)^2=1$ представляет собой либо 1^2, либо 4^2. Отсюда находим два решения: $x_1+3=1$; $x_2+3=4$, или $x_1=3$; $x_2=1$. (Обратим внимание, что $1=6$, $4=3^2$ по модулю 5.)

Но, как показывает таблица квадратов, среди вычетов по модулю 5 нет такого, квадрат которого равнялся бы двум или трем. Следовательно, некоторая часть квадратных уравнений из числа всех возможных совсем не будет иметь корней. Неразрешимо, например, такое уравнение: $x^2=2$. Возникает мысль: присоединить к множеству вычетов по модулю 5 столько новых «вычетов», сколько нужно, чтобы все рассматриваемые квадратные уравнения имели решение.

В самом деле, достаточно, например, присоединить «иррациональный вычет» $\sqrt{2}$, квадрат которого по определению равен двум, и тотчас уравнение $x^2=2$ становится разрешимым; его решение: $x=\sqrt{2}$.

Следует помнить, однако, что, искусственно расширяя множество вычетов, мы должны обеспечить также и выполнение условий нашей арифметики, т. е. чтобы в результате арифметических действий над числами расширенного множества «вычетов» получались только числа того же множества.

А если так, то к пяти вычетам 0, 1, 2, 3, 4 придется присоединить не один «иррациональный вычет» $\sqrt{2}$, а двадцать следующих:

$$\begin{array}{lllll}
\sqrt{2} & 1+\sqrt{2} & 2+\sqrt{2} & 3+\sqrt{2} & 4+\sqrt{2} \\
2\sqrt{2} & 1+2\sqrt{2} & 2+2\sqrt{2} & 3+2\sqrt{2} & 4+2\sqrt{2} \\
3\sqrt{2} & 1+3\sqrt{2} & 2+3\sqrt{2} & 3+3\sqrt{2} & 4+3\sqrt{2} \\
4\sqrt{2} & 1+4\sqrt{2} & 2+4\sqrt{2} & 3+4\sqrt{2} & 4+4\sqrt{2}
\end{array}$$

Вместе с вычетами 0, 1, 2, 3, 4 получается множество, состоящее из 25 элементов. Убедитесь в том, что, не выходя за рамки этого

множества, можно выполнять все арифметические действия.

Интересно, что в рассмотренном множестве, состоящем из 25 элементов, каждый элемент, кроме нуля, является той или иной целой степенью элемента $2+\sqrt{2}$. Так, $(2+\sqrt{2})^2=1+4\sqrt{2}$;

$(2+\sqrt{2})^3=(1+4\sqrt{2})\cdot(2+\sqrt{2})=4\sqrt{2}$;

$(2+\sqrt{2})^4=4\sqrt{2}\cdot(2+\sqrt{2})=3+3\sqrt{2}$;

$(2+\sqrt{2})^5=(3+3\sqrt{2})\cdot(2+\sqrt{2})=2+4\sqrt{2}$;

$(2+\sqrt{2})^6=(2+4\sqrt{2})\cdot(2+\sqrt{2})=2$;

. . . . . .

$(2+\sqrt{2})^{24}=1$.

АРИФМЕТИКА ВЫЧЕТОВ ПОМОГАЕТ ОБЫЧНОЙ АРИФМЕТИКЕ

Пусть требуется найти остаток от деления на 7 числа $13\cdot10^4+702^3\cdot61$.

Казалось бы, для этого надо сначала выполнить указанные действия, а затем получившийся результат разделить на 7. Но, как легко понять, мы получим искомый остаток, выполняя указанные действия не над самими числами 13, 10, 702 и 61, а над их вычетами по модулю 7, разумеется, по правилам арифметики вычетов, т. е. используя приведенные выше таблицы сложения и умножения.

Числа	13	10	702	61
Вычеты по модулю 7	6	3	2	5

Но $10^4=3^4=3\cdot3\cdot3\cdot3=4$, $702^3=2\cdot2\cdot2=1$. Далее, $6\cdot4+1\cdot5=1$. Искомый остаток найден. Вообще очевидно, что если некоторое число получается при помощи каких угодно комбинаций сложения, вычитания и умножения нескольких чисел, то вычет этого числа по модулю m равен такой же арифметической комбинации вычетов данных чисел.

Теперь мы можем по-новому взглянуть на некоторые известные нам признаки делимости и вывести новые.

ПРИЗНАКИ ДЕЛИМОСТИ

На 9. Чтобы узнать, делится ли некоторое число на 9, рассматривают сумму цифр этого числа: если сумма цифр делится на 9, то и само число делится на 9, а если сумма цифр не делится, то и само число не делится. Например, число 157 608 делится на 9 (сумма его цифр равна 27), а число 123 576 не делится. На чем основан этот хорошо известный признак делимости?

Мы знаем, что в десятичной системе счисления число 157 608 представляет собой сокращенную запись суммы

$$1\cdot10^5+5\cdot10^4+7\cdot10^3+6\cdot10^2+0\cdot10+8\cdot1. \quad (1)$$

Число 10 дает при делении на 9 остаток 1; степени числа 10 (10^2, 10^3,...) при делении на 9 также дают в остатке 1. Заменим в сумме (1) каждое из чисел $10^5, 10^4, 10^3, 10^2, 10$ его остатком от деления на 9, т. е. 1. Тогда мы получим сумму

$$1+5+7+6+0+8,$$

т. е. сумму цифр рассматриваемого числа. Остаток от деления на 9 у этой суммы должен быть таким же, что и у числа 157 608. Из этого и вытекает сформулированный выше признак делимости на 9.

На 11. Для нахождения признака делимости на 11 мы должны найти остатки от деления на 11 чисел 10, 10^2, 10^3, 10^4 и т. д. Проще всего это сделать, считая 10 не числом, а вычетом по модулю 11. Так как остаток от деления на 11 числа 10 равен 10, то по модулю 11

$$10^1=10,$$
$$10^2=10\cdot10=1,$$
$$10^3=10\cdot10^2=10\cdot1=10,$$
$$10^4=10\cdot10^3=10\cdot10=1,$$
$$10^5=10\cdot10^4=10\cdot1=10,$$

и т. д.

Мы видим, что вычеты четных степеней равны единице, а нечетных — равны десяти. Получается, что цифры, стоящие на четных местах (считая справа), надо множить на единицы, а цифры, стоящие на нечетных местах, — на 10. Вместо множителя 10 удобнее взять — 1 (так как $10=11-1$). Это дает нам следующий признак: если разность между суммой цифр, стоящих на нечетных местах (считая справа), и суммой цифр, стоящих на четных местах, делится на 11, то и взятое число делится на 11, а если эта разность не делится на 11, то и само число не делится на 11.

На 7. Попытаемся теперь найти признак делимости на 7. Возьмем то же число 157 608. Как и в случае делимости на 9, мы можем в сумме (1) заменить каждое из чисел 10^5, 10^4, 10^3, 10^2, 10 его остатком от деления на 7. Тогда вместо числа 157 608 мы получим гораздо меньшее число, имеющее тот же остаток от деления на 7, и легко сможем определить, делится ли

на 7 первоначально взятое число. Ведь действуя с вычетами по модулю 7, мы снова получим вычет, т. е. получим не больше шести. Поэтому ясно, что считать при помощи вычетов л е г ч е, тем более, что у нас есть таблица умножения вычетов! Остаток от деления на 7 числа 10 равен трем; отсюда

вычет числа 10 равен $3^1=3$,
вычет числа 10^2 равен $3^2=3\cdot3=2$,
вычет числа 10^3 равен $3^3=3\cdot3^2=6$,
вычет числа 10^4 равен $3^4=3\cdot3^3=4$,
вычет числа 10^5 равен $3^5=3\cdot3^4=5$.

Заменив числа 10, 10^2, 10^3, 10^4, 10^5 соответственно числами 3, 2, 6, 4, 5, мы получим вместо суммы (1) число

$$1\cdot5+5\cdot4+7\cdot6+6\cdot2+0\cdot3+8\cdot1=87.$$

Остаток от деления этого числа на 7 легко найти «в уме»: он равен 3. Таков же и остаток от деления числа 157 608 на 7.

Мы получаем такой признак делимости на 7: надо первую, вторую, третью... цифры числа, считая их с к о н ц а (т. е. справа), умножить соответственно на числа 1, 3, 2, 6, 4, 5,... и все полученные произведения сложить. Если эта сумма делится на 7, то и само число делится на 7, а если сумма не делится, то и само число не делится. Однако еще проще умножать цифры (беря их одну за другой справа) не на числа 1, 3, 2, 6, 4, 5, ..., а на числа 1, 3, 2, —1, —3, —2,...

Ведь $6=7-1$, и потому, отбросив семерку, мы найдем, что вместо числа 6 можно взять —1. Точно так же вместо 4 можно взять —3, а вместо 5 можно взять —2. Делается это для того, чтобы приходилось умножать на меньшие числа. Например, для выяснения делимости числа 25 518 на 7 составляем алгебраическую сумму:

$$8\cdot1+1\cdot3+5\cdot2-5\cdot1-2\cdot3=10;$$

мы видим, что остаток от деления числа 25 518 на 7 равен трем.

Предоставляем читателю самостоятельно проверить (считая, что 10 есть вычет по модулю 17), что для выяснения делимости некоторого многозначного числа на 17 нужно его цифры умножать (опять же, считая их справа налево) на следующие числа:

1, 10, 15, 14, 4, 6,...

или (заменяя некоторые из них отрицательными) на числа

1, —7, —2, —3, 4, 6,...

ТЕОРЕМА ФЕРМА

На первый взгляд указанные признаки делимости (например, на 7 и на 17) имеют один большой недостаток: если данное число очень велико, т. е. содержит много десятичных знаков, то, применяя этот признак, нужно будет прежде провести дополнительные вычисления, чтобы узнать, на какие множители нужно умножать следующие цифры. Иначе говоря, нужно вычислить остатки от деления (скажем, на 7) не только чисел 10, 10^2, 10^3, 10^4, 10^5, но и дальнейших степеней 10^6, 10^7 ,.., причем чем больше цифр в числе, тем для большего количества степеней числа 10 надо знать остатки от деления (на 7). Посчитаем, для примера, остатки от деления на 7 чисел 1, 10, 10^2, 10^3 и т. д. до 10^{20}. Как мы знаем, для этого надо 3 возводить в степень, считая, что 3 есть в ы ч е т по модулю 7. Если мы уже возвели вычет 3 в степень k, то для возведения его в степень $k+1$ нужно просто умножить результат еще раз на 3. Иначе говоря, каждый следующий вычет будет получаться из предыдущего умножением на 3. Зная это и пользуясь таблицей умножения вычетов по модулю 7, легко находим вычеты

$$1,3,2,6,4,5,1,3,2,6,4,5,1,3,2,\ 6,4,5,1,3,2, \qquad (2)$$

являющиеся остатками от деления на 7 чисел 1, 10, 10^2, 10^3, ..., 10^{20}. Сразу же бросается в глаза, что эти остатки п е р и о д и ч е с к и п о в т о р я ю т с я (период состоит из шести чисел). Это — общая закономерность: к а к о й б ы в ы ч е т м ы н и в з я л и (п о л ю б о м у м о д у л ю), п р и в о з в е д е н и и е г о в п о с л е д о в а т е л ь н ы е с т е п е н и (1-ю, 2-ю, 3-ю и т. д.) б у д у т п о л у ч а т ь с я р е з у л ь т а т ы, к о т о р ы е п е р и о д и ч е с к и п о в т о р я ю т с я. Нетрудно понять, почему это происходит. Например, в последовательности (2) каждый следующий вычет получался из предыдущего умножением на 3. Но ведь вычетов имеется лишь конечное число, так что через некоторое время нам обязательно встретится вычет, который уже стоял в этой последовательности ранее; пусть, например, на седьмом месте встретился такой же вычет, как и на первом; на восьмом месте будет такой же вычет, как и на втором: они получаются из вычетов, стоящих на седьмом и первом месте, умножением на 3. Далее, на девятом месте будет такой же вычет, как и на третьем, и т. д. Таким образом, с седьмого места будут

снова повторяться те же вычеты, которые шли начиная с первого места.

Итак, остатки от деления чисел 1, 10, 10^2, 10^3,... на какое-либо число периодически повторяются, так что надо знать лишь повторяющийся период, и можно будет применить признак делимости к сколь угодно большим числам.

Естественно, возникает вопрос: какова величина этого периода? Например, если мы рассматриваем остатки от деления чисел 1, 10^1, 10^2, 10^3,... на 17, то через сколько чисел эти остатки начнут повторяться? Ответ на этот вопрос дается следующей теоремой, доказанной замечательным математиком XVII в. Ферма.

Если p — простое число и a — некоторый вычет по модулю p, то вычеты

$$a,\ a^2,\ a^3,\ a^4,\ a^5,\ldots \qquad (3)$$

периодически повторяются, причем длина периода (т. е. число членов этой последовательности, после которых начинается повторение) является делителем числа $p-1$. Иначе говоря, число $p-1$ либо само является периодом, либо равно нескольким периодам. Следовательно, через каждые $p-1$ членов в последовательности (3) обязательно всё повторяется, т. е.

$$a^n = a^{n+(p-1)}.$$

В частности, при $n=1$ получаем: если p — простое число и a — некоторый вычет по модулю p, то имеет место соотношение $a=a^p$. Другая формулировка: если p — простое число, а a — произвольное число, то числа a и a^p имеют один и тот же остаток от деления на p, т. е. разность $a^p - a$ делится на p.

В таком виде часто и формулируют теорему Ферма.

Применим теорему Ферма к решению следующей задачи: каков остаток от деления на 7 числа $222^{555}+555^{222}$?

Прежде всего заменим основания степеней их остатками от деления на 7, т. е. заменим данное число следующим:

$$5^{555}+2^{222}.$$

Ответом на вопрос будет само это выражение $5^{555}+2^{222}$, если основания степени 5 и 2 считать в ы ч е т а м и по модулю 7. Так как 7 — простое число, то в силу теоремы Ферма через каждые 6 членов в последовательностях 2^1, 2^2, 2^3, ...; 5^1, 5^2, 5^3, ... обязательно всё повторяется. Число 555 имеет остаток 3 при делении на 6, а число 222 делится на 6. Поэтому

$$5^{555}=5^3, \quad 2^{222}=2^0,$$

или

$$5^{555}=5^3=5\cdot5\cdot5=4\cdot5=6; \quad 2^{222}=2^0=1.$$

Таким образом, $5^{555}+2^{222}=6+1=0$, т. е. первоначально заданное число $222^{555}+555^{222}$ делится на 7.

ОДИН СЕКРЕТ БЫСТРОГО СЧЕТА

Ваш друг задумал некоторое целое число, возвел его в куб, сообщил результат: 19 034 163 — и предложил отгадать задуманное число, т. е. из числа 19 034 163 извлечь кубический корень: $\sqrt[3]{19\,034\,163}$.

После недолгих размышлений вы сообщаете результат: 267. Друг изумлен; он повторяет испытание, предлагая извлечь кубический корень из других восьмизначных чисел, но всякий раз вы быстро и успешно справляетесь с задачей.

Овладеть таким мастерством нетрудно; для этого надо запомнить, какой цифрой оканчивается куб каждого из чисел первого десятка (в обычной арифметике): $1^3=1$, $2^3=8$, $3^3=27$, $4^3=64$, $5^3=125$, $6^3=216$, $7^3=343$, $8^3=512$, $9^3=729$, $10^3=1000$, — и надо запомнить (или иметь в своем распоряжении) таблицу кубов этих же чисел в арифметике вычетов по модулю 11.

Таблица вычетов по модулю 11 и их кубов

Вычеты	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
их кубы	0	1	8	5	9	4	7	2	6	3	10

Теперь рассуждаем так: 100^3 — это миллион; 1000^3 — это тысяча миллионов; значит, $\sqrt[3]{19\,034\,163}$ больше ста, но меньше тысячи, т. е.

является числом трехзначным; последняя цифра этого трехзначного числа 7 (определяем по последней цифре подкоренного числа), а первая цифра 2 (определяем по соображению: $200^3=8$ миллионов, $300^3=27$ миллионов, а под знаком радикала находится промежуточное число — 19 миллионов). Остается определить среднюю цифру x числа $2x7$.

Заменим подкоренное число его остатком от деления на 11. Этот остаток таков же, как у разности между суммой цифр, стоящих на нечетных местах (справа налево), и суммой цифр, стоящих на четных местах: $(3+1+3+9)-(6+4+1)=$ $=5$. Остаток от деления числа 19 034 163 на 11 равен пяти. Определяем по таблице, что вычет 5 — это куб вычета 3; значит, остаток от деления на 11 искомого числа $2x7$ с неизвестной цифрой x десятков равен 3. Отсюда легко определяется x:

$$3=(7+2)-x;\ x=6.$$

Результат готов: $\sqrt[3]{19\,034\,163}=267$.

Еще пример. Вычислить $\sqrt[3]{573\,856\,191}$.

Схема решения: искомое число — трехзначное; первая цифра 8, последняя 1; остаток от деления подкоренного числа на 11 таков же, как у разности 15—30, а эта разность в арифметике вычетов по модулю 11 равна 7; значит, и остаток равен семи; вычет 7 — это куб вычета 6 (см. таблицу). Чтобы остаток от деления искомого числа на 11 равнялся 6, средняя цифра должна быть числом $(8+1)-6=3$. Искомое число: 831.

ПОНЯТИЕ МНОЖЕСТВА

МНОЖЕСТВА КОНЕЧНЫЕ И БЕСКОНЕЧНЫЕ

Обычно арифметику определяют как науку о числах. Числа в простейшем смысле слова, т. е. так называемые натуральные числа:

$$1,\ 2,\ 3,\ 4,\ 5,\ldots,$$

отвечают на вопрос «сколько»: сколько учеников в классе? Сколько книг лежит на столе? Сколько гусей плавает на пруду?

Но каждый раз, когда мы спрашиваем: «Сколько предметов?»,— мы должны иметь эти предметы, их совокупность. Вот мы и говорим о совокупности всех учеников, образующих данный класс, о совокупности книг, лежащих на столе, о совокупности гусей, плавающих на пруду. Каждое натуральное число есть число предметов (одушевленных или неодушевленных), образующих некоторую совокупность. Иногда эти предметы легко сосчитать, например, когда идет речь о числе книг, лежащих на столе, или о числе учеников, сидящих в классе.

Но значительно труднее ответить на вопрос, сколько в данный момент плавает китов в мировом океане или даже сколько ежиков живет в подмосковных лесах. И уж совсем трудно точно сказать, сколько молекул в стакане воды или звезд в нашей Галактике. Однако во всех этих случаях мы уверены, что число это конечное, хотя, может быть, и очень большое и недоступное для точного вычисления при данном состоянии наших научных познаний.

В математике рассматриваются не только конечные, но и бесконечные совокупности.

Простейшим примером такой совокупности является совокупность, или, как принято говорить, множество, всех натуральных чисел:

1, 2, 3, 4, 5,...

Мы уже сказали, что каждое натуральное число есть число предметов, образующих ту или иную конечную совокупность, то или иное множество. Но множество в с е х натуральных чисел уже не есть конечное множество. На вопрос: «Сколько всего натуральных чисел?»— приходится ответить, что их бесконечно много. Какое бы большое число натуральных чисел мы ни задумали, всегда есть такие натуральные числа, которые не вошли в число задуманных.

В математике мы постоянно сталкиваемся с примерами бесконечных множеств. Возьмем, например, равносторонний треугольник T_1; впишем в него равносторонний треугольник T_2. Вершины треугольника T_2 суть середины сторон треугольника T_1. Таким же образом впишем в T_2 равносторонний треугольник T_3, в T_3 впишем T_4 и так далее (рис. 1). Это построение приводит к бесконечному множеству равносторонних треугольников:

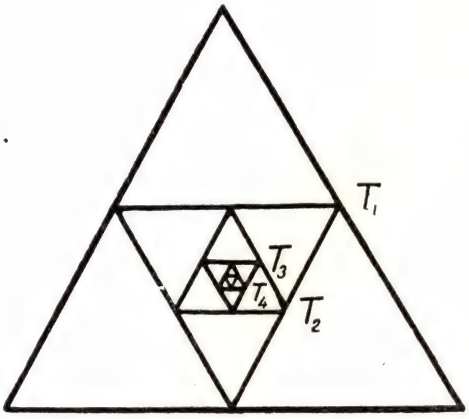
$$T_1, T_2, T_3, T_4, T_5, \ldots, T_n, \ldots \qquad (1)$$

Тем более бесконечным является множество всех вообще равносторонних треугольников, лежащих в данной плоскости.

Последняя фраза несколько двусмысленна: слово «более» может быть воспринято в ней как составная часть выражения «тем более», употребленного в смысле «и подавно». Раз есть уже бесконечное множество равносторонних

треугольников, получающихся при некотором определенном построении, то и подавно множество всех равносторонних треугольников бесконечно. Но слово «более» может быть понято и как сравнительная степень прилага-

Рис. 1.



тельного, и тогда высказанное выше суждение означает, что множество всех равносторонних треугольников, лежащих в данной плоскости, в каком-то смысле является «более бесконечным», чем бесконечное множество построенных нами треугольников

$$T_1, T_2, T_3, \ldots, T_n, \ldots \qquad (1)$$

Как видите, мы затронули интересный вопрос, долгое время отпугивавший ученых своей (впрочем, лишь кажущейся) парадоксально-

стью: существуют ли, если можно так выразиться, различные «степени» бесконечности? Возможна ли количественная оценка бесконечных множеств, позволяющая утверждать, что одно из двух бесконечных множеств является «более бесконечным», чем другое? Или же утверждение, что данное множество является бесконечным, окончательно в том смысле, что не дает возможности дальнейших различений или градаций количественного характера.

Первым, кто пытался ответить на этот вопрос, был знаменитый чешский математик и философ Бернгард Больцано (1781—1848), но он не сумел полностью преодолеть все трудности, которые при этом возникли. Постараемся разобраться, в чем эти трудности и каково решение поставленного вопроса.

ВЗАИМНО-ОДНОЗНАЧНОЕ СООТВЕТСТВИЕ МЕЖДУ ДВУМЯ МНОЖЕСТВАМИ

Предположим, что мы имеем два конечных множества, например корзину яблок и корзину груш. Желая установить, чего у нас больше — яблок или груш, мы можем (и это будет самое простое решение вопроса) сосчитать число плодов в каждой корзине. Получим два числа, сравнение их и даст ответ на наш вопрос.

Но если мы имеем два бесконечных множества, то определить аналогичным образом, какое из них является «более бесконечным», а какое — «менее», нельзя по той простой причине, что бесконечное множество нельзя «сосчитать». Во всяком случае, мы не знаем, как это сделать. Поэтому постараемся ответить на вопрос, чего у нас больше — яблок или груш, не сосчитывая их, т. е. не пользуясь понятием числа. Вот какой представляется для этого путь.

Разложим наши яблоки, хотя бы на столе, и попробуем поставить против каждого яблока по груше. Возможны три случая (рис. 2).

Первый случай: против каждого яблока действительно окажется груша, и при этом не только все яблоки, но и все груши окажутся разложенными. В этом случае, очевидно, у нас столько же яблок, сколько и груш.

Второй случай: против каждого яблока окажется по груше, но при этом еще останется несколько груш в корзине — в этом случае у нас больше груш, чем яблок. Наконец, возможен последний, третий случай: стараясь разложить все груши так, чтобы против каждого яблока лежала груша, мы не достигнем цели — нам не хватит груш. Тогда, очевидно, груш меньше, чем яблок.

Вы видите, мы смогли произвести количественную оценку двух множеств — корзины яблок и корзины груш, не сосчитывая точно, сколько имеется тех и других плодов, но установив, каких плодов больше, или убедившись, что их имеется одинаковое количество. Эту оценку мы произвели, установив, как говорят, *взаимно-однозначное соответствие* между одним множеством и другим или частью другого. Может быть, читатель на этом одном примере еще не уяснил себе, что такое *взаимно-однозначное соответствие между двумя множествами*, поэтому приведем еще несколько примеров.

Дается концерт. Чтобы на него пойти, надо купить билет. Перед нами два множества: множество людей, которые хотят пойти на этот концерт,— обозначим его через A — и множество билетов — обозначим его через B. Возможны разные случаи. Первый (не очень вероятный, но математически самый простой): все желающие пойти на концерт приобрели билеты,

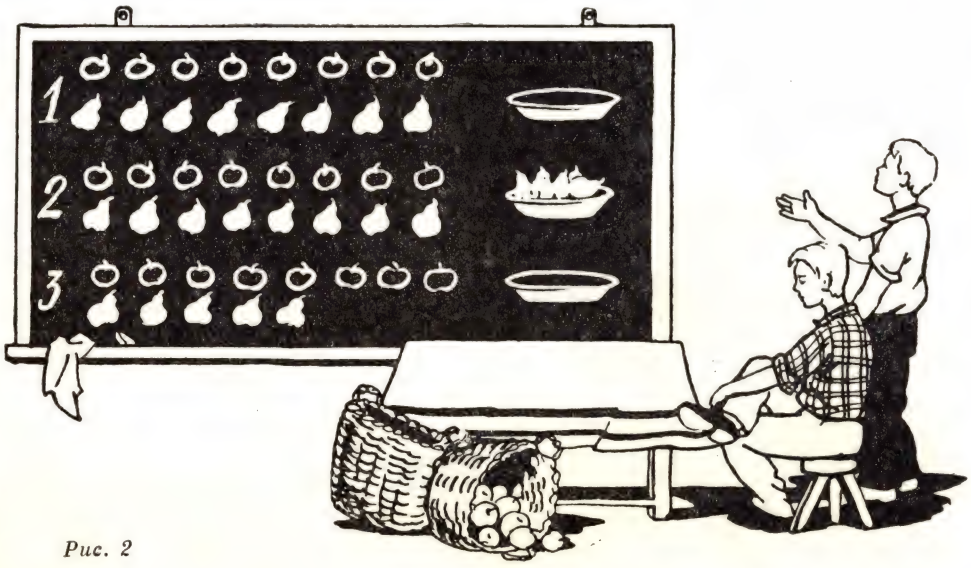


Рис. 2

и все билеты при этом оказались проданными. Тогда каждому элементу множества A (т. е. каждому человеку, желающему пойти на концерт) соответствует определенный элемент множества B (купленный этим человеком билет). При этом каждый элемент множества B поставлен в соответствие одному единственному элементу множества A (человеку, купившему этот билет). Установлено взаимно-однозначное соответствие между множеством A и множеством B или установлено взаимно-однозначное отображение одного из этих множеств на другое.

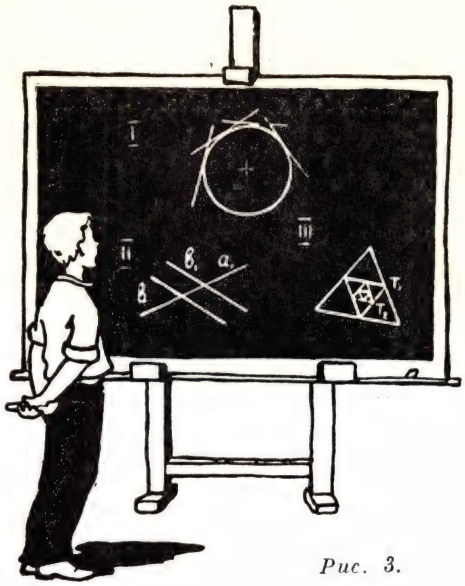


Рис. 3.

Однако может случиться, что каждый человек, желавший пойти на концерт, купил себе билет, но в кассе остались еще нераспроданные билеты. Опять получается взаимно-однозначное отображение множества A, но уже не на всё множество B, а только на некоторую его часть — на ту часть, или, как говорят, на то подмножество, множества B, которое состоит из всех проданных билетов. Может, наконец, случиться, что все билеты проданы, но не все желающие пойти на концерт смогли купить билеты. Тогда обозначим через A' множество тех людей, которые не только хотели пойти на концерт, но и получили на него билет. Множество A' оказалось взаимно-однозначно отображенным на множество B.

В математике можно найти многочисленные примеры взаимно-однозначных соответствий. Например, каждой вершине треугольника или тетраэдра соответствует противоположная этой вершине сторона или грань. Таким образом, установлено взаимно-однозначное соответствие между множеством всех вершин треугольника (тетраэдра) и множеством всех его сторон (граней). Множество всех сторон правильного многоугольника находится во взаимно-однозначном соответствии со множеством всех перпендикуляров, которые опущены на эти стороны из центра правильного многоугольника. Множество всех боковых граней пирамиды находится во взаимно-однозначном соответствии со множеством апофем этой пирамиды и т. д.

Особенно существенным является тот факт, что взаимно-однозначное соответствие возможно и между некоторыми бесконечными множествами. Приведем примеры. Обозначим через A множество всех точек данной окружности, а через B — множество всех прямых, являющихся касательными к этой окружности (рис. 3). Между множествами A и B установится взаимно-однозначное соответствие, если мы каждой точке окружности поставим в соответствие касательную в этой точке. Таким образом, каждому элементу множества A соответствует единственный элемент множества B и каждый элемент множества B (т. е. каждая касательная) при этом поставлен в соответствие единственному элементу множества A — точке прикосновения данной касательной.

Второй пример. Возьмем две пересекающиеся прямые a_1 и b_1 (рис. 3). Обозначим через A множество всех точек прямой a_1, а через B — множество, состоящее из прямой b_1 и из всех прямых, ей параллельных. Каждому элементу b множества B (т. е. каждой прямой b, параллельной прямой b_1 или совпадающей с ней) соответствует единственный элемент множества A — единственная точка прямой a_1, в которой ее пересекает прямая b.

В качестве третьего примера возьмем уже рассмотренное нами множество равносторонних треугольников:

$$T_1, T_2, \ldots, T_n \ldots,$$

каждый из которых, кроме первого, вписан в предыдущий. Множество всех этих треугольников обозначим через X. Каждый треугольник получил определенное натуральное число n в качестве своего номера.

Номером треугольника T_n является натуральное число n. Этим, очевидно, установлено взаимно-однозначное соответствие между множеством X наших треугольников и множеством всех натуральных чисел.

СЧЕТНЫЕ МНОЖЕСТВА

Вообще, если все элементы какого-нибудь множества X удается занумеровать посредством натуральных чисел так, что каждое натураль-

ное число придано в качестве номера лишь одному элементу множества X, то такой нумерацией устанавливается взаимно-однозначное соответствие между данным множеством X и множеством всех натуральных чисел. И обратно, всякое взаимно-однозначное соответствие между каким-нибудь множеством X и множеством всех натуральных чисел можно рассматривать как нумерацию (сосчитывание) элементов множества X посредством натуральных чисел — мы просто приписываем каждому элементу множества X в качестве номера соответствующее ему натуральное число.

Мы здесь коснулись очень важного понятия. Ведь установление взаимно-однозначного соответствия между некоторым множеством X и множеством всех натуральных чисел есть прямое перенесение в область бесконечных множеств пересчитывания какого-либо конечного множества (например, корзины яблок или стада гусей) с помощью натуральных чисел. Только в случае конечных множеств мы для сосчитывания его элементов нуждаемся лишь в конечном числе чисел (мы считаем: раз, два, три и так далее до того числа, которое показывает, сколько у нас яблок в корзине или гусей в стаде). В примере множества треугольников

$$T_1,\ T_2\ T_3,\ \ldots,\ T_n,\ \ldots$$

или вообще любого множества X, которое может быть приведено во взаимно-однозначное соответствие с множеством всех натуральных чисел, мы вынуждены в качестве номеров пользоваться всеми натуральными числами.

Но теперь возникает самый главный, основной для всей теории множеств вопрос. Всегда ли можно занумеровать элементы бесконечного множества натуральными числами так, чтобы каждый элемент данного множества получил определенный номер?

Другими словами: можно ли установить взаимно-однозначное соответствие между произвольным бесконечным множеством и множеством всех натуральных чисел?

Оказывается, ответ на этот вопрос — отрицательный, и мы постараемся убедиться в этом. Но сначала несколько подготовимся. Прежде всего установим название для тех множеств, которые могут быть поставлены во взаимно-однозначное соответствие с множеством всех натуральных чисел. Эти множества называются **счетными**. Это название естественно: счетное множество — это такое множество, которое может быть сосчитано посредством натуральных чисел. Наша задача — показать, что существуют несчетные множества т. е. такие, которые не могут быть поставлены во взаимно-однозначное соответствие с множеством всех натуральных чисел.

МНОЖЕСТВО ВСЕХ РАЦИОНАЛЬНЫХ ЧИСЕЛ СЧЕТНО

В поисках несчетного множества обратимся к множеству всех рациональных чисел (читатель, конечно, помнит, что рациональными называются все целые и все дробные числа). Посмотрим, можно ли занумеровать все рациональные числа с помощью натуральных? Для простоты рассмотрим сначала все положительные рациональные числа и попробуем их как-нибудь занумеровать. Мы сразу же сталкиваемся с трудностью: среди положительных рациональных чисел заведомо нет наименьшего числа, каким является единица среди натуральных чисел: ведь каково бы ни было положительное рациональное число r, число $\frac{1}{2}r$ также является положительным рациональным числом, и оно меньше, чем r. Но предположим, мы обойдем эту трудность, начав наш счет с какого-нибудь рационального числа r_1, которое согласимся считать первым. Но тогда на следующем этапе возникает такая трудность: какое рациональное число считать вторым, т. е. непосредственно следующим в порядке нашего счета за числом r_1? Дело в том, что, какое бы рациональное число $r_2 > r_1$ мы ни взяли, имеются рациональные числа, бо́льшие чем r_1 и меньшие чем r_2, и таких бесконечное множество: например, числа

$$r_3 = \frac{1}{2}(r_1 + r_2),\quad r_4 = \frac{1}{2}(r_1 + r_3), \ldots$$

Таким образом, среди всех рациональных чисел, бо́льших чем выбранное нами число r_1, нет наименьшего. Какое же объявить первым из следующих за r_1? Но возникшая трудность — кажущаяся. Она показывает только, что невозможно занумеровать рациональные числа с помощью натуральных чисел таким образом, чтобы при этой нумерации возрастающим номерам соответствовали возрастающие числа. Придется попытаться занумеровать рациональные числа как-нибудь иначе, не стремясь к тому, чтобы число r_2, первое после r_1 в порядке нашего счета, было и первым по величине, т. е. наименьшим из всех, следующих за r_1. А тогда нужная нам нумерация находится очень легко.

В самом деле, каждое положительное рациональное число однозначно записывается в виде

несократимой дроби $\frac{p}{q}$ (целое число n будем при этом записывать в виде дроби $\frac{n}{1}$ и также считать ее несократимой). Назовем **высотой** дроби $\frac{p}{q}$ натуральное число $p+q$. Под высотой рационального числа мы будем понимать высоту той единственной несократимой дроби, которая является записью данного рационального числа.

Посмотрим, сколько приходится рациональных чисел на каждую данную высоту. Высоту 1 не имеет ни одно положительное рациональное число (потому что, записывая рациональное число в виде несократимой дроби $\frac{p}{q}$ видим, что ее высота равна натуральному числу $p+q$, а так как $p \geqslant 1$, $q \geqslant 1$, то $p+q \geqslant 2$). Высоту 2 имеет, очевидно, единственное рациональное число $\frac{1}{1}=1$.

Высоту 3 имеют дроби $\frac{1}{2}$ и $\frac{2}{1}$, т. е. рациональные числа $\frac{1}{2}$ и 2.

Высоту 4 имеют дроби $\frac{1}{3}$, $\frac{2}{2}$, $\frac{3}{1}$.

Среди них оставляем лишь несократимые: $\frac{1}{3}$ и $\frac{3}{1}$.

Итак, высоту 4 имеют рациональные числа $\frac{1}{3}$ и 3.

Высоту 5 имеют дроби

$$\frac{1}{4}, \frac{2}{3}, \frac{3}{2}, \frac{4}{1},$$

среди которых нет сократимых, так что на высоту 5 приходится 4 числа.

Высоту 6 имеют дроби

$$\frac{1}{5}, \frac{2}{4}, \frac{3}{3}, \frac{4}{2}, \frac{5}{1},$$

среди которых несократимыми являются лишь первая и последняя; следовательно, высоту 6 имеют числа $\frac{1}{5}$ и 5.

Продолжая рассуждать таким образом дальше, мы прежде всего убеждаемся в том, что, каково бы ни было натуральное число $h>1$, есть лишь одно конечное число рациональных чисел с этой высотой.

В самом деле, дроби с высотой h — это, очевидно,

$$\frac{1}{h-1}, \frac{2}{h-2}, \ldots, \frac{h-1}{1}.$$

Их конечное число: $h-1$. Среди этих дробей некоторые могут оказаться сократимыми, а остальные дадут рациональные числа с высотой h.

Теперь уже очень легко занумеровать все положительные рациональные числа: мы начинаем с наименьшей высоты 2 и идем дальше, все время увеличивая на единицу высоту и сосчитывая то (всегда конечное) число рациональных чисел, которое приходится на данную высоту.

Таким образом, число $1=r_1$ получает номер 1. Далее идут два числа $r_2=\frac{1}{2}$ и $r_3=2$ высоты 3, потом два числа $r_4=\frac{1}{3}$ и $r_5=3$ высоты 4, потом четыре числа $r_6=\frac{1}{4}$, $r_7=\frac{2}{3}$, $r_8=\frac{3}{2}$, $r_9=4$ высоты 5, два числа $r_{10}=\frac{1}{5}$, $r_{11}=5$ высоты 6 и т. д. Получаем таблицу (через h_n обозначено число рациональных чисел высоты h).

Высота	Число данной высоты
2	$r_1\,(n_2=1)$
3	$r_2,\ r_3\,(n_3=2)$
4	$r_4,\ r_5\,(n_4=3)$
5	$r_6,\ r_7,\ r_8,\ r_9\ (n_5=4)$
. . .	. . . . .

Так как каждое рациональное число имеет своей высотой некоторое натуральное число h, оно найдет свое место в строке, соответствующей этой высоте, и получит определенный номер, не больший чем число $n_2+n_3+\ldots+n_{h-1}+n_h$.

Итак, множество всех положительных рациональных чисел есть счетное множество.

МНОЖЕСТВО ВСЕХ ДЕЙСТВИТЕЛЬНЫХ ЧИСЕЛ НЕСЧЕТНО

И тем не менее несчетные множества существуют. Оказывается, что множество всех действительных чисел — **несчетно**. Этот замечательный факт, как и теорема о счетности множества всех рациональных чисел, впервые был доказан знаменитым немецким математиком Георгом Кантором (1845—1918), основателем современной теории множеств.

Воспроизводим доказательство Кантора. Доказываем, что несчетным является уже множество всех действительных чисел интервала $(0;1)$[1].

Каждое такое действительное число может быть записано в виде бесконечной десятичной дроби с целой частью нуль. При этом каждому действительному числу соответствует лишь одна такая запись, за исключением действи-

[1] Под интервалом $(a,\ b)$ числовой прямой понимается множество всех действительных чисел x, удовлетворяющих неравенству $a<x<b$.

тельных чисел, выражаемых конечными десятичными дробями: каждое такое число, например 0,2476622021711, может быть записано двумя способами в виде бесконечной десятичной дроби: в виде

$$0{,}24766220217110000000000\ldots$$

и

$$0{,}24766220217109999999999\ldots$$

Одна из этих записей начиная с некоторого момента содержит одни лишь нули, а другая — одни девятки. Если мы согласимся не употреблять записей, в которых начиная с какого-нибудь места идут одни девятки, то каждое действительное число будет иметь лишь единственную запись в виде бесконечной десятичной дроби. Докажем теперь теорему о несчетности множества действительных чисел от противного: предположим, что множество всех действительных чисел [мы говорим все время о числах x интервала $(0\,;1)$] счетно, т. е. может быть занумеровано посредством натуральных чисел. Тогда вся совокупность действительных чисел интервала (0; 1) может быть записана в виде последовательности:

$$x_1,\ x_2,\ldots$$

Запишем разложение числа x_n в бесконечную десятичную дробь в виде

$$x_n = 0\,,\ a_1^{(n)}\,a_2^{(n)}\,a_3^{(n)}\,a_4^{(n)}\ldots a_n^{(n)},$$

где $a_1^{(n)}, a_2^{(n)}, a_3^{(n)}, \ldots$ суть последовательные десятичные знаки числа x_n, причем, согласно заключенному нами условию, не может случиться, что все десятичные знаки начиная с некоторого суть девятки.

Итак, все действительные числа x [интервала (0; 1)] предполагаются записанными в виде

$$\text{(I)}\quad \begin{cases} x_1 = 0,\ a_1^{(1)}\ a_2^{(1)}\ a_3^{(1)}\ a_4^{(1)}\ a_5^{(1)}\ \ldots\ a_n^{(1)} \\ x_2 = 0,\ a_1^{(2)}\ a_2^{(2)}\ a_3^{(2)}\ a_4^{(2)}\ a_5^{(2)}\ \ldots\ a_n^{(2)} \\ x_3 = 0,\ a_1^{(3)}\ a_2^{(3)}\ a_3^{(3)}\ a_4^{(3)}\ a_5^{(3)}\ \ldots\ a_n^{(3)} \\ x_4 = 0,\ a_1^{(4)}\ a_2^{(4)}\ a_3^{(4)}\ a_4^{(4)}\ a_5^{(4)}\ \ldots\ a_n^{(4)} \\ \cdot\quad\cdot\quad\cdot\quad\cdot\quad\cdot\quad\cdot\quad\cdot\quad\cdot\quad\cdot\quad\cdot \\ x_n = 0,\ a_1^{(n)}\ a_2^{(n)}\ a_3^{(n)}\ a_4^{(n)}\ a_5^{(n)}\ \ldots\ a_n^{(n)} \end{cases}$$

Приведем наше предположение к противоречию, найдя действительное число ξ, заключенное между 0 и 1 и заведомо не входящее в таблицу (I). Для этого рассмотрим цифры, стоящие по диагонали таблицы (I), а именно

$$a_1^{(1)},\ a_2^{(2)},\ a_3^{(3)},\ a_4^{(4)},\ a_5^{(5)},\ \ldots,\ a_n^{(n)},$$

и выберем для каждого n натуральное число b_n, не превосходящее число 8 и отличное от числа $a_n^{(n)}$(например, при $a_n^{(n)} < 8$ полагаем $b_n = a_n^{(n)} + 1$, а при $a_n^{(n)} = 8$ полагаем $b_n = 7$).

Рассмотрим бесконечную десятичную дробь

$$0{,}b_1b_2b_3b_4b_5\ldots b_n.$$

Она не содержит ни одной девятки и выражает число ξ, заключенное между 0 и 1, заведомо отличное от всех чисел $x_1, x_2, x_3, \ldots, x_n$. В самом деле, если бы было

$$\xi = x_n = 0,\ a_1^{(n)}\ a_2^{(n)}\ \ldots\ a_n^{(n)},$$

то на n-ом месте в разложении числа ξ мы должны были бы иметь цифру $a_n^{(n)}$, тогда как мы действительно имеем $b_n \neq a_n^{(n)}$.

Теорема доказана.

МОЩНОСТЬ МНОЖЕСТВА

Нам нужно осмыслить полученный результат и подвести некоторые итоги всему до сих пор сказанному. Мы начали с понятия взаимно-однозначного соответствия между двумя множествами, возможность которого (в случае конечных множеств) равносильна тому, что оба множества состоят из одного и того же числа элементов.

Это обстоятельство указывает путь и к установлению «количественного равенства», или количественной эквивалентности, между двумя бесконечными множествами. Мы скажем, что два (конечных или бесконечных) множества количественно эквивалентны или имеют одну и ту же мощность, если между ними возможно установить взаимно-однозначное соответствие. Понятие «одинаковой мощности» означает для конечных множеств, что они состоят из одного и того же числа элементов.

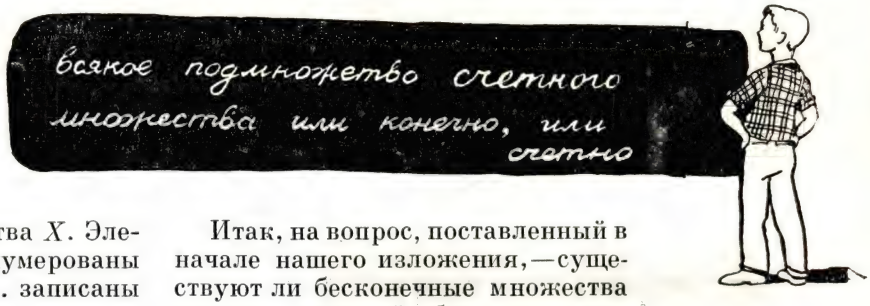
Далее скажем, что множество A имеет бо́льшую мощность, чем множество B, если можно множество B отобразить взаимно-однозначно на часть множества A и в то же время нельзя отобразить множество A на часть множества B. Теперь можем сказать, что счетные множества — это множества, количественно эквивалентные множеству натуральных чисел. Но существуют множества и несчетные, например множество всех действительных чисел, заключенных между 0 и 1, или, как принято говорить, интервала (0; 1), и, как нетрудно видеть, всякого интервала[1].

Для того чтобы убедиться в том, что всякое несчетное множество имеет бо́льшую мощность, чем каждое счетное множество (все счетные множества имеют, очевидно, одну и ту же мощность), надо доказать следующие два предложения:

[1] Всякий интервал числовой прямой может быть (например, подобным растяжением или сжатием) взаимно-однозначно отображен на интервал (0; 1).

1. *Всякое подмножество счетного множества или конечно, или счетно.*

2. *Всякое бесконечное (значит, в частности, всякое несчетное) множество содержит счетное.*



Доказательство первого утверждения. Пусть X — счетное множество, X_0 — какое-нибудь подмножество множества X. Элементы множества X могут быть занумерованы посредством натуральных чисел, т. е. записаны в виде

$$x_1,\ x_2,\ x_3, \ldots,\ x_n, \ldots \qquad (2)$$

Среди этих элементов содержатся и все элементы множества X_0. Пусть это будут — в порядке возрастания номеров в последовательности (2) — элементы

$$x_{n_1},\ x_{n_2},\ x_{n_3}, \ldots,\ x_{n_k}, \ldots \qquad (3)$$

Возможно одно из двух: или последовательность (3) обрывается на каком-то конечном шаге k, т. е. множество X_0 состоит из конечного числа элементов $x_{n_1}, x_{n_2}, \ldots, x_{n_k}$, или же мы имеем бесконечную последовательность $x_{n_1}, x_{n_2}, \ldots x_{n_k}$, которую можем переписать, полагая

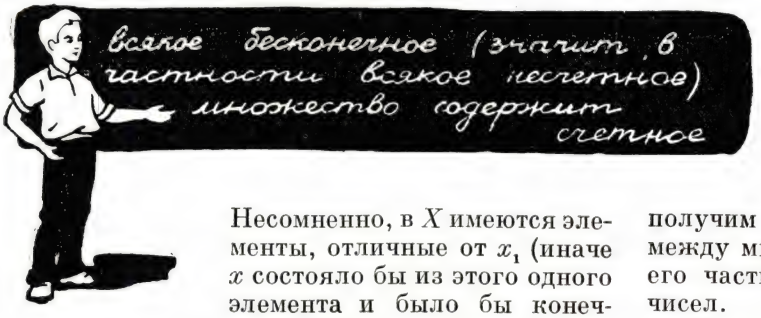
$$y_1 = x_{n_1},\ y_2 = x_{n_2}, \ldots,\ y_k = x_{n_k}, \ldots,$$

в виде

$$y_1,\ y_2, \ldots,\ y_k, \ldots,$$

непосредственно показывающем, что X_0 — счетное множество.

Доказательство второго утверждения. Пусть X — бесконечное множество. Выбираем в X какой-нибудь элемент x_1.



Несомненно, в X имеются элементы, отличные от x_1 (иначе x состояло бы из этого одного элемента и было бы конечным). Возьмем один из таких элементов и обозначим его через x_2. Элементы x_1 и x_2 не исчерпывают множества X, поэтому существует элемент x_3 множества X, отличный как от x_1, так и от x_2. И так далее. Продолжая этот процесс, получим счетное множество

$$x_1,\ x_2,\ x_3, \ldots,\ x_n, \ldots$$

содержащееся в X.

Итак, на вопрос, поставленный в начале нашего изложения, — существуют ли бесконечные множества разных «степеней бесконечности» (т. е. разных мощностей) — мы можем ответить утвердительно: существуют состоящие из действительных чисел множества двух различных мощностей — множество всех действительных чисел какого-нибудь интервала, с одной стороны, и любое счетное множество действительных чисел (например, множество положительных рациональных чисел) — с другой. К этому выводу мы пришли, обосновывая количественную оценку бесконечных множеств при помощи понятия взаимно-однозначного соответствия. Однако не следует думать, что взаимно-однозначное соответствие между бесконечными множествами во всем похоже на взаимно-однозначное соответствие между множествами конечными.

Очевидно, никакое конечное множество нельзя взаимно-однозначно отобразить на свою часть (часть никогда не равна целому). Уже простейшие примеры показывают, что это утверждение решительно перестает быть верным в области бесконечных множеств: мы видели, что всякое бесконечное подмножество счетного множества счетно, т. е. счетное множество может быть взаимно-однозначно отображено на всякую свою бесконечную часть. Например, подписывая под всеми натуральными числами подряд все четные

1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10...
2, 4, 6, 8, 10, 12, 14, 16, 18, 20...,

получим взаимно-однозначное соответствие между множеством всех натуральных чисел и его частью — множеством одних лишь четных чисел.

Другой пример: существует взаимно-однозначное отображение между множеством всех действительных чисел (между всей числовой прямой) и любым ее интервалом.

Для того чтобы получить такое соответствие, можно поступить так. Построим в плоскости окружность, касающуюся сверху оси абсцисс, и возьмем нижнюю полуокружность PQ этой окружности (рис. 4). Концы

P и Q полуокружности к ней не причисляются. Установим взаимно-однозначное соответствие между всеми точками полуокружности PQ и всеми точками числовой прямой. Для этого сначала поставим в соответствие каждой точке ξ

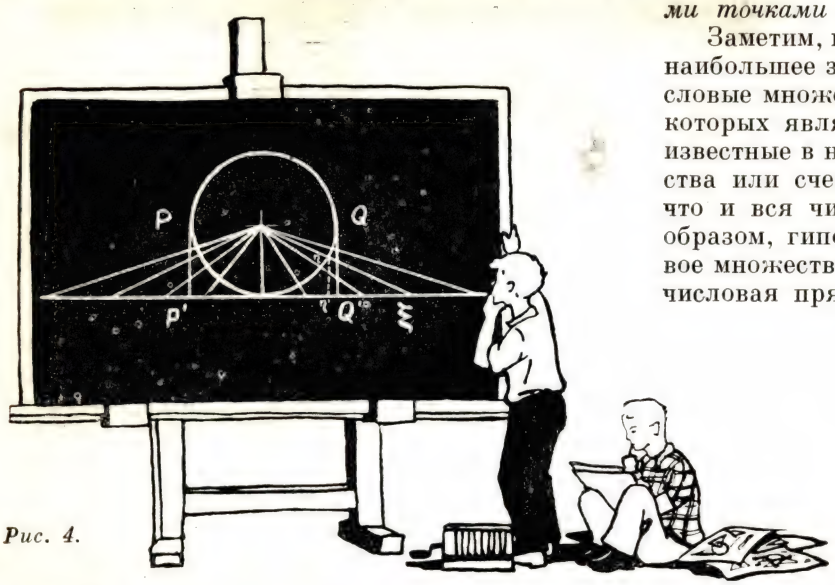


Рис. 4.

прямой ту точку η полуокружности, в которой ее пересекает луч, идущий из центра окружности в точку ξ.

Теперь спроектируем полуокружность PQ на интервал $P'Q'$ оси абсцисс и поставим в соответствие точке η полуокружности ее проекцию η'.

В результате каждой точке ξ прямой оказалась поставленной в соответствие точка η' интервала $P'Q'$, и полученное соответствие есть взаимно-однозначное отображение всей числовой прямой на интервал $P'Q'$.

Можно доказать и другие, кажущиеся на первый взгляд парадоксальными, теоремы о мощности различных множеств. Упомянем лишь одну из них: *существует взаимно-однозначное соответствие между всеми точками прямой и всеми точками плоскости.*

Заметим, наконец, следующее. В математике наибольшее значение имеют так называемые числовые множества, т. е. множества, элементами которых являются действительные числа. Все известные в настоящее время числовые множества или счетны, или имеют ту же мощность, что и вся числовая прямая. Возникла, таким образом, гипотеза, что всякое несчетное числовое множество имеет ту же мощность, что и вся числовая прямая. Эта гипотеза была высказана еще Кантором и известна под названием континуум-гипотезы. Она не доказана до сих пор, что связано, по-видимому, с большими общепознавательными трудностями, возникающими при рассмотрении произвольных числовых множеств. Трудности эти получают свое освещение в так называемой математической логике, и мы о них здесь, конечно, говорить не можем.

Эта статья имеет своей целью дать лишь начальное представление о некоторых простейших понятиях обширной области математики — теории множеств, области, возникшей менее чем сто лет назад. Читатель, желающий познакомиться с теорией множеств более основательно, может обратиться, например, к первым главам книги П. С. Александрова «Введение в общую теорию множеств и функций», М., Гостехиздат, 1948.

Первое знакомство с теорией вероятностей

НАУКА О СЛУЧАЙНОМ

Случайным нам кажется то, что нарушает обычный ход событий. Вы спешите в школу, садитесь в автобус. Но автобус испортился,— и вы опоздали на урок. Случайное событие повлияло на сегодняшний день, на обычный распорядок вашей жизни.

Возьмем другой пример. Вы собрались погулять в выходной день, но погода внезапно переменилась настолько, что нельзя выйти из дому. Опять непредвиденное вмешательство случая нарушило нормальный ход событий в вашей жизни.

Конечно, не всегда случайные события приносят огорчения. Вы просматриваете, например, таблицу выигрышей лотереи и видите номер вашего лотерейного билета; здесь случайное явление — выигрыш — вам на пользу. Или, например, вы встретили на улице своего друга, не сговариваясь с ним. Это тоже приятное случайное событие.

Общей чертой всех таких случайных событий, однако, остается то, что они нарушают нормальный, плановый ход явлений. Именно

поэтому нередко мы говорим: со случайностями надо бороться.

В общественной жизни случайные события также могут иметь место. Представьте себе, например, что урожай какой-то сельскохозяйственной культуры на данном участке погиб из-за неожиданной засухи. Это — тяжелая случайность. Есть и много других тяжелых случайностей, которые пока не может предугадать наука. Мы знаем, например, что землетрясение, от которого страдают все живущие в данной местности,— пока еще непредвиденная случайность. Мы говорим о «стихийных силах природы», которые наука еще не может преодолеть.

Но наука стремится дать человеку обоснованные средства борьбы с вредными случайностями.

Какие же могут быть средства борьбы, например, со случайностями непогоды? Можно всесторонне изучать жизнь растений в условиях данной местности и производить посев засухоустойчивыми или морозоустойчивыми семенами, если в этом есть надобность, — при этом влияние случайностей непогоды на урожай станет меньше. Можно стараться определить заранее, будут или не будут, скажем, сильные заморозки весной, и подготовить средства укрытия или обогрева растений в зависимости от этого. Можно, наконец, попытаться найти общие законы, управляющие чередованием плохой и хорошей погоды, и принять меры предосторожности в соответствии с этими законами.

В тех случаях, когда случайность может принести пользу, также желательно изучить законы, по которым происходят случайные явления, чтобы сделать эту пользу возможно большей.

СУЩЕСТВУЮТ ЛИ ЗАКОНОМЕРНОСТИ СЛУЧАЙНЫХ ЯВЛЕНИЙ

С первого взгляда может показаться, что никаких законов, управляющих случайными событиями, быть не может: на то эти события и случайны. Однако, если присмотреться к делу как следует, можно прийти к выводу, что и случайные явления часто не являются совсем уж хаотическими. Во многих случаях тут обнаруживаются определенные закономерности. Эти закономерности не похожи на обычные законы физических явлений; они весьма своеобразны. И все же можно утверждать, что законы случайных явлений существуют.

Возьмем пример настолько простой, что каждый сам может наблюдать описываемые ниже явления. Уже на этом простейшем примере легко обнаружить общие законы случая.

Представим себе, что вы бросаете на стол монету и смотрите, какая ее сторона окажется сверху. Возможны два случая: или монета ляжет на стол кверху гербом, или же сверху окажется та сторона, на которой обозначена стоимость монеты. Бросая монету один раз, нельзя предугадать, какой стороной она упадет. Но если бросать монету сто раз подряд, то уже многое можно сказать о том, сколько раз наверху окажется та и сколько другая сторона монеты.

Можно уверенно утверждать, что герб выпадет не один и не два раза, а больше, но и не 98 или 99 раз, а меньше. В самом деле, ведь монета сделана очень точно, и при бросании ни одна сторона ее не имеет преимуществ перед другой. Поэтому естественно ожидать, что примерно в половине случаев монета выпадет гербом кверху и в половине случаев — кверху цифрой. Число выпадений герба, таким образом, вероятно, будет близко к 50. Но нельзя, разумеется, утверждать, что это число будет точно равно 50. Однако можно с уверенностью предсказать, что число выпадений герба будет заключено между 40 и 60. Можно проверить это на опыте и убедиться, что это всегда оказывается так.

Можно предсказать явление даже еще точнее, и не будет слишком смелым заранее предсказать, что число выпадений герба будет заключено между 43 и 57, а число выпадений цифры — соответственно между 57 и 43. Но, каково будет точное число выпадений герба, предсказать нельзя — это зависит от случая. Как мы видим, однако, и случай имеет свои законы: в нашем примере он приводит к тому, что число выпадений герба в различ-

ных сотнях бросаний будет меняться в пределах от 43 до 57, но почти никогда он не может дать больше 57 или меньше 43 выпадений герба [1].

Возьмем другой пример. Вы познакомились с хорошим стрелком, о котором говорят, что он дает 93% попаданий. Что означает это утверждение?

Оно означает, что из каждых 100 выстрелов, которые стрелок делает по мишени, примерно 93 пули попадают в цель, а около 7 пролетают мимо. При этом можно предсказать, что и из следующих 100 выстрелов, которые стрелок только собирается произвести, удачными будут около 93 выстрелов; уверенно можно утверждать, например, что число попаданий будет больше 80. (Разумеется, с течением времени средний процент попаданий для данного стрелка, возможно, изменится — стрелок может усовершенствоваться в стрельбе или же, наоборот, разучиться стрелять. Примерно то же можно сказать и об охотнике).

Возьмем третий пример закономерности, относящейся к явлениям, представляющимся с первого взгляда совершенно случайными. Когда в семье должен родиться ребенок, никто не может предсказать заранее, будет ли это мальчик или девочка. Если даже ожидать, что в семье будет несколько детей (скажем, два, три или четыре ребенка), то и здесь также заранее нельзя сказать, сколько из них будет мальчиков. Но во всех странах и среди всех народов всегда на 1000 родившихся в среднем приходится 511 мальчиков и 489 девочек; это поразительное постоянство процента рождений мальчиков и девочек отмечалось многими учеными, среди которых был и один из основателей теории вероятностей — французский математик Симон Лаплас (1749—1827). Поэтому в тех случаях, когда нас интересует число мальчиков среди очень большого числа новорожденных, мы можем уверенно предсказать это число с большой степенью точности и никогда не ошибемся. Просматривая в свое время списки рождений по городу Парижу за 1745—1784 гг., Лаплас обнаружил, что отношение числа мальчиков к общему числу рождений здесь оказалось равным примерно 0,510, т. е. чуть меньше, чем 0,511. Несмотря на то что разница была очень мала, Лаплас заключил, что есть какая-то специальная причина, увеличивающая число девочек: ведь число рождений в Париже за 39 лет и в те годы уже было очень большим; поэтому даже такое малое отклонение от обычного отношения нельзя было объяснить действием случая.

И действительно, Лаплас обнаружил причину отклонения: она заключалась в том, что в число детей, рожденных в Париже, включались также и дети, подкинутые в специальный приют—единственный на всю Францию. Так как французские крестьяне ценили в сыновьях будущих работников, то они чаще подкидывали девочек, чем мальчиков. Исключив подкидышей из числа родившихся (многие из них на самом деле родились не в Париже), Лаплас получил и для Парижа обычное отношение числа мальчиков к числу девочек. Тем самым он показал, что в случае очень большого числа рождений можно предсказать общее число родившихся мальчиков с точностью до 0,1%— отклонение такого порядка может объясняться только какими-то специальными причинами.

Попытаемся теперь выразить те закономерности, о которых шла речь, на языке математики.

Пусть имеется событие A, которое в каждом отдельном случае может наступить или же не наступить. Пусть, далее, произведено N испытаний, из которых в M случаях событие A наступило, а в $N-M$ случаях не наступило. Частота события A (т. е. доля числа испытаний, в которых событие A имеет место) здесь равна $\frac{M}{N}$. При этом для больших N частота события оказывается примерно постоянной; так, например, при наблюдении падений брошенной монеты частота $\frac{M}{N}$ выпадения герба всегда близка к $\frac{1}{2}$, а в случае определения пола новорожденных частота $\frac{M}{N}$ рождения мальчиков близка к 0,511.

[1] Точнее говоря, можно подсчитать, что если очень много раз производить по 100 бросаний монеты, то лишь примерно в 15% случаев число выпадений герба будет больше 57 или меньше 43. Этот подсчет дает нам пример еще более тонкой закономерности, которой подчиняются случайные события.

Основной закон случайных явлений и заключается в устойчивости частоты определенного события при очень большом количестве испытаний (случаев). При этом чем больше произведено испытаний, тем меньше будут случайные отклонения частоты от среднего ее значения.

Этот закон имеет огромное практическое приложение во многих областях народного хозяйства.

Можно утверждать даже, что нет ни одной области народного хозяйства, в которой не применялись бы этот и другие законы случайных явлений, о которых мы будем говорить впоследствии.

Возьмем в качестве следующего примера страхование жизни. Пусть какой-то мужчина в возрасте 55 лет хочет застраховать свою жизнь. Чтобы знать, сколько следует взять с застрахованного и сколько нужно будет выплатить родственникам в случае его смерти, надо рассчитать, сколько людей в возрасте 55 лет останется в живых, например, через 5 или через 10 лет и сколько из них умрет в течение этого срока. Кажется, что здесь нельзя что-либо предвидеть — ведь никто не знает, когда он умрет. Но оказывается, что при большом числе случаев можно уверенно предсказать то количество людей, которое останется в живых после 60 или 65 лет.

Поэтому, рассматривая всю массу застрахованных, можно сделать очень точное предсказание — тем более точное, чем большее количество людей охвачено страхованием.

Аналогично этому можно заранее рассчитать необходимое в данном городе число пожарных команд или запасы зерна, которые надо иметь на случай неурожая.

ЧТО НАЗЫВАЕТСЯ ВЕРОЯТНОСТЬЮ СОБЫТИЯ

Устойчивая частота определенного случайного события называется **вероятностью** этого события. Изучение вероятностей и законов, которым они подчиняются, составляет содержание **теории вероятностей**.

В некоторых случаях вероятность события легко определить заранее, не производя никаких испытаний. Какова, например, вероятность выпадения герба при бросании монеты? Заранее ясно, что имеется столько же шансов на то, что это событие наступит, как и на то, что оно не наступит. Поэтому вероятность наступления рассматриваемого события A здесь равна $\frac{1}{2}$. Это записывается так:

$$P(A)=\frac{1}{2}.$$

Последнее выражение означает, что при большом числе бросаний монеты герб выпадет примерно в половине всех случаев.

А что значит выражение

$$P(A)=0{,}003?$$

Это выражение означает, что при большом числе испытаний рассматриваемое событие наступит только в трех случаях из тысячи.

Утверждение

$$P(A)=1$$

означает, что событие A наступит обязательно. Так, например, равна единице вероятность того, что завтра утром взойдет солнце. Напротив, равенство $P(A)=0$ означает, что событие A невозможно; так, например, равна нулю вероятность того, что при бросании монеты на стол она станет на ребро.

Ниже мы познакомимся с задачами, которыми занимается теория вероятностей.

Первые задачи, которые будут приведены в качестве примеров, могут показаться не слишком серьезными. Это — задачи о шансах на выигрыш при игре в кости. Однако следует иметь в виду, что теория вероятностей начала развиваться в XVII столетии именно при решении вопросов, возникавших при игре в кости. Математики по этому поводу шутя говорят, что глупая игра в кости породила большую и мудрую науку, очень важную для практической деятельности людей, в то время как умная игра в шахматы в истории науки никакой роли не сыграла.

ПРИ РЕШЕНИИ КАКИХ ЗАДАЧ ВОЗНИКЛА ТЕОРИЯ ВЕРОЯТНОСТЕЙ

Приведем теперь некоторые простые задачи из числа тех, которые были решены еще в XVII столетии.

Представьте, что вы бросаете на стол игральную кость — кубик, 6 граней которого занумерованы числами от 1 до 6. Какова вероятность того, что при бросании кости на верхней грани выпадает число 5?

Всех возможностей для кости лечь на стол той или иной гранью

имеется 6. Так как все грани равноправны, то каждая из них будет выпадать в одной шестой от общего числа случаев; значит,

$$P(5) = \frac{1}{6},$$

где $P(5)$ — вероятность выпадения пятерки.

Какова вероятность того, что при бросании кости выпадет четное число очков?

Благоприятных возможностей здесь будет 3: выпадение чисел 2, 4, 6. Поэтому

$$P_{(\text{четн.})} = \frac{3}{6} = \frac{1}{2}.$$

Какова вероятность одновременного выпадения числа 5 на двух костях?

При бросании двух костей мы будем иметь 36 возможных случаев: (1, 1), (1, 2), (1, 3), ..., (1, 6), (2, 1), (2, 2), ..., (2, 6) и т. д. до (6, 1), (6, 2)..., (6, 6) (здесь первая цифра указывает число очков, выпавшее на первой, а вторая — на второй кости). Все эти случаи совершенно равноправны; поэтому

$$P(5,5) = \frac{1}{36}.$$

Заметим еще, что, как оказалось,

$$P(5,5) = P(5) \cdot P(5).$$

Это соотношение является частным случаем важной теоремы умножения вероятностей, на которой, однако, мы здесь не можем задерживаться.

Какова вероятность того, что сумма числа очков, выпавших при бросании двух костей, будет равна 8?

Составим таблицу тех случаев, при которых сумма очков будет равна 8. Это будут случаи:

(2, 6), (3, 5), (4, 4), (5, 3), и (6, 2).

Таким образом, мы видим, что всего имеется пять благоприятствующих нашему условию комбинаций. Но каждая отдельная комбинация реализуется, как мы установили при решении предыдущей задачи примерно в $\frac{1}{36}$ части всех бросаний; поэтому условие о равенстве суммы очков числу 8 будет выполняться примерно в пяти случаях из каждых 36 бросаний. Таким образом, искомая вероятность здесь равна $\frac{5}{36}$. Приведем теперь один немного более сложный исторический пример, показывающий, как в XVII столетии практические запросы игроков в кости помогали развитию теории вероятностей, т.е., в конечном счете, помогали научно ставить вопросы о законах случая.

Один французский рыцарь, кавалер де Мере, был страстным игроком в кости. Он всячески старался разбогатеть при помощи игры и для этого придумывал разные усложненные правила, которые, как ему казалось, приведут его к цели. В то время стремление разбогатеть при помощи азартных игр охватывало, как болезнь, многих людей.

Де Мере придумал, в частности, такие правила игры. Он предлагал бросить одну кость четыре раза подряд и бился об заклад, что при этом хотя бы один раз выпадет 6; если же этого не случалось — ни разу не выпадало 6 очков, то выигрывал его противник. Точное значение вероятности того, что в этих условиях выпадет 6, в то время было неизвестно, хотя было видно, что оно близко к $\frac{1}{2}$. Де Мере предполагал, что он будет чаще выигрывать, чем проигрывать, но все же обратился к своему знакомому, одному из крупнейших математиков XVII столетия — Блезу Паскалю (1623—1662) с просьбой рассчитать, какова вероятность выигрыша в придуманной им игре.

Приведем расчет Паскаля.

При каждом отдельном бросании вероятность выпадения 6 равняется $\frac{1}{6}$. Вероятность же того, что не выпадет 6 очков, равна $\frac{5}{6}$.

Далее, пусть мы бросим кость дважды. Повторим опыт, состоящий в двукратном бросании кости, многократно, скажем, N раз. Тогда примерно в $\frac{5}{6}$ из этих N случаев на кости, брошенной первый раз, не выпадает 6. Из числа этих $\frac{5}{6} \cdot N$ случаев примерно в $\frac{5}{6}$, т. е. всего в $\frac{5}{6}\left(\frac{5}{6}N\right) = \left(\frac{5}{6}\right)^2 \cdot N$ случаев не выпадает 6 и при втором бросании кости. Таким образом, вероятность того, что при двукратном бросании кости ни разу не выпадет 6 очков, равна

$$\left(\frac{5}{6}\right)^2 = \frac{25}{36}.$$

Точно так же показывается, что вероятность того, что ни разу не выпадет 6 при трехкратном бросании кости, равна

$$\left(\frac{5}{6}\right)^3 = \frac{125}{216}.$$

Наконец, вероятность того, что при четырехкратном бросании ни разу не выпадет 6, равна

$$\left(\frac{5}{6}\right)^4 = \frac{625}{1296}.$$

Таким образом, для рыцаря де Мере вероятность проигрыша была равна

$$\frac{625}{1296}, \text{ т. е. меньше } \frac{1}{2};$$

следовательно, вероятность выигрыша была больше половины. Значит, при каждой игре больше половины шансов было за то, что рыцарь выиграет; при многократном же повторении игры он почти наверное оказывался в выигрыше.

Действительно, чем больше рыцарь играл, тем больше он выигрывал. Кавалер де Мере был очень доволен и решил, что он открыл верный способ обогащения. Однако постепенно другим игрокам стало ясно, что эта игра для них невыгодна, и они перестали играть с де Мере. Надо было придумывать какие-то новые правила, и де Мере придумал новую игру. Он предложил бросать 2 кости 24 раза и бился об заклад, что сверху, хотя бы один раз, окажутся две пятерки. Де Мере считал, что и в этой игре он будет чаще выигрывать, чем проигрывать.

Но на этот раз рыцарь ошибся. Вероятность одновременного выпадения двух пятерок при бросании двух костей равна, как мы знаем, $\frac{1}{36}$; поэтому вероятность того, что не выпадут две пятерки, равна $\frac{35}{36}$. Вероятность того, что при 24-кратном бросании двух костей ни разу не выпадут две пятерки, равна соответственно

$$\left(\frac{35}{36}\right)^{24}, \text{ что больше } \frac{1}{2}.$$

Следовательно, для рыцаря вероятность проигрыша была больше половины. Это значило, что чем больше рыцарь будет играть, тем больше он будет проигрывать. Так и случилось. Чем больше он играл, тем больше разорялся и в конце концов сделался нищим.

Самое интересное в этом историческом анекдоте заключается в том, что благодаря таким своеобразным «практическим запросам» появилась теория расчета случайных явлений. В XVII и XVIII вв. ученые смотрели на эти примеры как на «забавные случаи» приложения математических знаний к явлениям, которые не имеют широкого распространения. Ведь игрок в кости, мечтающий о богатстве, никак не заслуживает, чтобы в помощь ему была создана специальная наука.

КАКИЕ ЗАДАЧИ РЕШАЛИ МЕТОДАМИ ТЕОРИИ ВЕРОЯТНОСТЕЙ ВО ВРЕМЯ ВОЙНЫ

Но оказалось, что область приложений теории вероятностей изумительно широка. Теория вероятностей занимается изучением всех массовых явлений, т. е. всех часто повторяющихся случаев, в какой бы области жизни, науки или техники они ни встречались.

Приведем пример из военной области. Хорошо известно, что очень трудно, почти невозможно, сбить самолет выстрелом из винтовки. Ведь стрелок должен не только попасть в самолет, но и поразить его в уязвимое место. Поэтому вероятность того, что самолет будет сбит единичным выстрелом из винтовки, совершенно ничтожна — в каждом отдельном случае стрелок почти наверное не попадет в самолет. Совсем иначе обстоит дело при массовом обстреле. Теория вероятностей помогает рассчитать, сколько нужно сделать одновременных выстрелов по самолету противника для того, чтобы можно было надеяться сбить самолет.

Покажем приемы этого расчета. Допустим, что вероятность сбить самолет одним выстрелом равна 0,004; другими словами, вероятность того, что стрелок не попадет в самолет, равна 0,996. Стрелок может стрелять в самолет очень много раз и все-таки имеет очень мало шансов попасть в него.

Предположим теперь, что в самолет одновременно стреляют 500 стрелков. Вероятность того, что ни один из 500 стрелков не поразит самолет, может быть вычислена по формуле

$$(0{,}996)^{500}$$

(сравните с расчетами проигрыша в двух играх кавалера де Мере). С помощью таблиц логарифмов можно обнаружить, что

$$(0{,}996)^{500} \approx 0{,}14.$$

Таким образом, вероятность того, что ни один из 500 одновременных винтовочных выстрелов не попадет в самолет, составляет всего 0,14. Другими словами, вероятность попадания в самолет, вероятность того, что самолет будет сбит, равна 0,86. Можно сказать, что самолет почти наверное будет сбит залпом из 500 выстрелов; у него гораздо меньше шансов уйти невредимым из-под такого обстрела, чем шансов погибнуть.

На самом деле вероятность попадания отдельного стрелка в самолет обычно меньше, чем 0,004; чаще ее следует считать близкой к 0,001. Однако и в этом случае вероятность сбить самолет залпом из 500 выстрелов равна 0,54, т. е. имеется больше шансов сбить самолет, чем не сбить.

Теория вероятностей использовалась во время последней войны также для определения самых целесообразных методов поисков самолетов или подводных лодок противника или для указания путей, позволяющих уклониться от встречи с ними. Типичной здесь является, например, задача о том, как выгоднее всего вести караваны торговых судов по океану, в котором действуют вражеские подводные лодки. Если организовывать караваны из большого числа судов, то можно будет обойтись меньшим числом караванов, что делает менее вероятной встречу с подводной лодкой противника; при этом, однако, увеличивается ущерб, который может нанести подобная встреча. Методы теории вероятностей помогли рассчитать наиболее благоприятный режим судоходства в военных условиях, т. е. самые выгодные размеры караванов и частоту их отправления. Задач такого рода возникало настолько много, что при военном командовании пришлось создать специальные группы, занимавшиеся расчетами, связанными с теорией вероятностей. Подобные расчеты после войны стали применяться и к многочисленным хозяйственным вопросам мирного времени; они составили содержание нового большого направления, названного исследованием операций, которое на наших глазах оформляется в самостоятельную науку.

НЕСКОЛЬКО СЛОВ ОБ ИСТОРИИ РАЗВИТИЯ ТЕОРИИ ВЕРОЯТНОСТЕЙ

В XVII столетии теорией вероятностей занимались такие выдающиеся математики, как французы Б. Паскаль и П. Ферма и голландец Х. Гюйгенс. При этом первые вклады в теорию вероятностей были сделаны, как мы уже отмечали, в связи с изучением азартных игр.

Однако уже в конце XVII в. начали пользоваться теорией вероятностей при страховании кораблей от случайностей, т. е. начали подсчитывать, сколько шансов на то, что корабль вернется в порт невредимым, что он не будет потоплен бурей, не будет захвачен пиратами, что груз на нем не подмокнет, не сгорит, не сгниет и т. д. Такой расчет позволял определить, какую страховую премию следует выплачивать владельцу корабля или владельцу груза в том случае, если корабль не вернется в порт или если груз испортится, так, чтобы это было выгодно владельцу страховой конторы.

В первой половине XVIII в. для развития теории вероятностей очень много сделал швейцарец Яков Бернулли — член Российской Академии наук. Вслед за ним следует назвать французских академиков С. Лапласа и

С. Д. Пуассона и замечательного немецкого математика К. Ф. Гаусса, работавших в конце XVIII и начале XIX в.

При всем том, в течение второй половины XVIII в. и первой половины XIX в. теория вероятностей в известном смысле «топталась на месте»,— в то время еще не была ясна связь между различными явлениями жизни и наукой о массовых явлениях. В середине XIX в. очень большой сдвиг в теории вероятностей произвели труды знаменитого русского математика П. Л. Чебышёва. Он нашел некоторые новые методы решения ранее поставленных задач и сумел создать вокруг себя большую группу молодых ученых, из которых некоторые впоследствии достигли мировой известности. В первую очередь здесь надо упомянуть А. А. Маркова, А. М. Ляпунова; несколько позже развернулась деятельность академика С. Н. Бернштейна — нашего современника, здравствующего и ныне. Советская школа теории вероятностей, возглавляемая академиком А. Н. Колмогоровым, поддерживает традиции дореволюционной русской математики — она бесспорно стоит на одном из первых мест в мировой науке.

КАКИЕ ЗАДАЧИ РЕШАЮТ МЕТОДАМИ ТЕОРИИ ВЕРОЯТНОСТЕЙ В НАШЕ ВРЕМЯ

Постепенно в XIX в. многие физики пришли к той точке зрения, что выводы теории вероятностей могут быть приложены и к физическим явлениям. Во второй половине XIX в. в трудах англичанина К. Максвелла, австрийца Л. Больцмана и американца Д. В. Гиббса зародилась так называемая «статистическая физика», представляющая собой область физики, специально изучающая огромные совокупности атомов и молекул, составляющие любое вещество, с точки зрения теории вероятностей.

С середины XIX в. учение о вероятностях развивалось с огромной быстротой, завоевывая все новые и новые области применения. Самая наука о случайном получила новое освещение. По мере того как массовые случайные явления изучались все глубже, открывались и новые законы случая.

Практическое значение теории вероятностей — той ветви математики, которая изучает массовые явления, с каждым годом становится все больше и больше. В последнее время теория вероятностей нашла, например, важные приложения в астрономии. Значение теории вероятностей для астрономии очень сильно возросло с тех пор, как астрономы стали изучать не только отдельные планеты и звезды, но целые массы звезд — звездные скопления, а также внегалактические туманности, или галактики, состоящие из невообразимо большого количества отдельных звезд. За последнее время в астрономии стало развиваться также направление, изучающее методами теории вероятностей всю массу галактик, подобных той огромной звездной системе, к которой принадлежит наше Солнце со всеми планетами; огромное число галактик во Вселенной позволяет подходить к ним с методами, относящимися к массовым явлениям.

Освобождение атомной энергии, создание атомных бомб, а затем и атомных электростанций, атомных двигателей и т. д. поставили новые серьезные задачи перед теорией вероятностей. В любой атомной установке основную роль играют ядерные реакции —процессы деления или слияния атомных ядер, вызываемые их случайными столкновениями с мельчайшими элементарными частицами (в первую очередь нейтронами) и друг с другом. При этом крайне важно очень точно заранее рассчитать ход всех процессов в установке — мельчайшая ошибка в этом отношении может привести к грандиозной катастрофе. И здесь на помощь приходит теория вероятностей — несмотря на случайный характер отдельных атомных столкновений, она позволяет с огромной точностью определить, как будут происходить изменения во всей массе атомов.

Кустарное производство имеет в настоящее время всюду весьма малое значение; напротив, значение массового производства все больше возрастает. Поэтому возрастает важность для промышленности теории массовых явлений, позволяющей научно обоснованно вести производство. Нужны научно обоснованные методы контроля качества изделий, методы определения доли бракованных изделий по наблюдению лишь небольшой части из них. Нет ни одного завода, который не нуждался бы в использовании выводов теории вероятностей для практики.

При этом отдельный завод часто не в состоянии решить те проблемы научного подхода к явлениям, которые возникают

в его практике. Над созданием общей теории массовых явлений, охватывающей множество конкретных задач, возникающих на производстве, работают математики — специалисты по теории вероятностей.

В настоящее время почти все отрасли массового производства применяют выводы теории вероятностей.

Каждый из нас пользуется автоматическим телефоном. Возможность устройства автоматических телефонных станций обоснована теорией вероятностей. Для того чтобы пояснить роль теории вероятностей в телефонии, остановимся на одном довольно специальном примере.

Многие из вас обращались к «говорящим часам» — автоматическому устройству на телефонной станции, быстро отвечающему вам, который час. Теория вероятностей позволила рассчитать примерное число людей одновременно обращающихся к «говорящим часам» с целью узнать время. И хотя людей, которые в любую минуту и даже секунду могут поинтересоваться по телефону, который час, в Москве очень много, у «говорящих часов» практически никогда не бывает «очереди»; когда к ним ни обращаешься — всегда телефон свободен. Это происходит потому, что теория вероятностей позволяет сделать расчет, сколько людей и в какое время будет обращаться за справкой. Исходя из этого, можно определить минимальное количество комплектов автоматических аппаратов, необходимое для того, чтобы удовлетворить потребности миллионов жителей города.

ТЕОРИЯ ВЕРОЯТНОСТЕЙ И ТЕОРИЯ ИНФОРМАЦИИ

Роль теории вероятностей для практики особенно бурно растет в наши дни. Возникают новые большие разделы теории вероятностей, которые сразу же находят многочисленные применения. Совершенно очевидно, что очень скоро ни один хороший инженер не сможет обойтись без знания этой науки; в будущем же знание теории вероятностей станет необходимым для всякого образованного человека. В нашей стране все время увеличивается количество технических учебных заведений, в которых изучается теория вероятностей, а в некоторых других странах, например в Японии, элементы теории вероятностей уже введены в программу средней школы.

Выше мы уже упоминали об одном весьма важном новом направлении в науке, тесно связанном с теорией вероятностей,— о так называемом исследовании операций. В заключение остановимся еще на одном совсем молодом, но весьма важном разделе теории вероятностей — на так называемой теории информации.

Теория вероятностей занимается случайными событиями, исход которых заранее нам неизвестен. Поэтому выяснение того, какой исход имело какое-либо из подобных событий, несколько увеличивает наши знания, или, как обычно говорят, дает нам какую-то новую информацию. При этом очевидно, что в разных случаях увеличение наших знаний будет совершенно разным: знание того, какой стороной легла на стол монета при однократном бросании, меньше знания исходов двух бросаний той же монеты, а знание того, выпадет ли уже снег в Москве к ноябрьским праздникам, следует считать гораздо более ценным, чем знание того, выпадет ли снег к зимним каникулам; в последнем мы можем быть совершенно уверены без всякой проверки. В 1947—1948 гг. талантливый американский математик и инженер Клод Шеннон указал метод, позволяющий численно измерить «количество информации», содержащееся в выяснении результата того или иного опыта со случайным исходом, что сразу же оказалось очень полезным для многих задач естествознания и техники.

Непосредственно работы Шеннона были связаны с вопросами телеграфии. Телеграфный аппарат служит для передачи определенной информации; при этом естественно поставить вопрос о том, как передавать эту информацию наиболее экономным образом. Хорошо известно, что часто передача ведется при помощи так называемой азбуки Морзе, согласно которой буквы передаются определенными комбинациями точек и тире; так, например, буква «е», по азбуке Морзе, изображается одной точкой «.», а буква «ш» — четырьмя тире «— — — —». Легко объяснить, почему запись буквы «е», по

азбуке Морзе, сделана более короткой, чем запись буквы «ш»: действительно, в передаче первая буква встречается много чаще второй, и поэтому для нее нам гораздо важнее иметь короткое обозначение. Таким образом, уже при создании азбуки Морзе были учтены неодинаковые

вероятности появления в сообщении различных букв — это обстоятельство и было использовано для того, чтобы сделать запись передаваемых с помощью этой азбуки сообщений возможно более короткой. Еще больший эффект можно получить, если учитывать то обстоятельство, что вероятность каждой буквы в сообщении существенно зависит от переданной перед ней буквы. Действительно, если предыдущая буква была гласной, то вероятность согласной резко повышается, а если предыдущая буква была «ч», то почти наверное следующей будет «и», «е» или «т» (как в слове «что»). Подобные расчеты, непосредственно относящиеся к теории вероятностей, проводил еще в свое время замечательный русский математик А. А. Марков, тщательно проанализировавший в этих целях отрывки из «Евгения Онегина» и других произведений классической русской литературы. Но лишь Шеннон связал эти расчеты с общим вопросом о «количестве информации», которое можно передать по телеграфу в единицу времени, и вывел отсюда практические правила, позволяющие указать самые выгодные приемы передачи сообщений.

В дальнейшем указанная Шенноном возможность численной оценки «количества информации» оказалась очень ценной не только для узких целей телеграфии, но и во всех тех случаях, когда мы имеем дело с какой бы то ни было передачей или накоплением определенных знаний. Здесь речь может идти и об автоматической регулировке движения поездов, и о современных математических машинах, самостоятельно решающих заданные им сложнейшие задачи, и о передаче нервными волокнами человека определенных сигналов, идущих от органов чувств к коре головного мозга и обратно — от головного мозга к мускулам. В настоящее время теория информации служит основным математическим аппаратом к и б е р н е т и к и — большого направления, объединяющего ряд наук и изучающего широкий круг явлений, относящихся к технике, физике, биологии, экономике.

Справочный отдел

Что читать по математике

Читатель, заинтересовавшийся проблемами, о которых рассказывалось в статьях этого раздела 3-го тома Детской энциклопедии, может углубить и расширить свои знания, обратившись к большой научно-популярной литературе по математике. Здесь мы даем краткий перечень рекомендуемой литературы.

К вводной статье «Несколько слов о математике» тесно примыкает брошюра:

Колмогоров А. Н. О профессии математика, изд. 2-е, изд-во МГУ, 1952.

В этой брошюре, написанной одним из крупнейших советских математиков, рассказывается о том, чем занимаются математики-исследователи и в чем состоят так называемые математические способности.

По разделу «Числа» можно рекомендовать следующую литературу:

Статья Башмаковой И. Г. «Происхождение систем счисления», помещенная в «Энциклопедии элементарной математики», т. 1, М., изд-во АПН РСФСР, 1951.

В этой статье рассказывается о происхождении различных систем счисления и способов нумерации чисел у различных народов с древнейших времен до наших дней.

Гельфонд А. О. Решение уравнений в целых числах, Гостехиздат, 1952.

Книга рассказывает о решении неопределенных уравнений как первой степени, так и более высоких степеней.

О простых числах и связанных с ними проблемах можно прочитать в книге:

Шнирельман Л. Г. Простые числа, Гостехиздат, 1940.

Следует заметить, однако, что эта книга хотя и предполагает у читателя знание математики в объеме средней школы (кроме последнего раздела, где используются начала математического анализа), все же написана довольно трудно. Более простое изложение ряда проблем, связанных с простыми числами и другими вопросами арифметики, можно найти в книгах:

Берман Г. Н. Число и наука о нем, изд. 2-е, Гостехиздат, 1954.

Трост Э. Простые числа, М., Физматгиз, 1954.

Ряд интересных очерков о свойствах чисел содержится в книгах:

Радемахер Г. и Теплиц О. Числа и фигуры, Гостехиздат, 1935.

Депман И. Я. Рассказы о математике, Детгиз, 1957.

По теории чисел интересны также следующие книги:

Хинчин А. Я. Три жемчужины теории чисел, Гостехиздат, 1947.

В этой книге излагается решение трех трудных проблем теории чисел, доставивших в свое время немало хлопот математикам, пытавшимся их решить.

Хинчин А. Я. Великая теорема Ферма, ОНТИ, 1934.

В этой книге рассказывается история попыток решить великую проблему Ферма о том, имеет ли уравнение $x^n + y^n = z^n$ решения в целых положительных числах. Эта проблема не решена полностью до сих пор. В книге дается решение ее частных случаев.

Хинчин А. Я. Цепные дроби, изд. 2-е, Гостехиздат, 1956.

В этой книге излагается теория цепных дробей. Эта теория вполне доступна школьнику старших классов. Ее элементы имеются в приложении к школьному учебнику алгебры А. П. Киселева. Эта теория имеет большие теоретические и технические применения.

Курант Р. и Роббинс Г. Что такое математика. Элементарный очерк идей и методов, М.—Л., Гостехиздат, 1947.

К разделу «Культура счета и приближенные вычисления» рекомендуем следующую литературу:

Статья Брадиса В. М. «Устный счет и письменный счет. Вспомогательные средства вычислений», помещенная в «Энциклопедии элементарной математики», т. I, изд-во АПН РСФСР, 1951.

В этой статье рассказывается о рациональных правилах устных, письменных и инструментальных вычислений.

Депман И. Я. Рассказы о решении задач, Л., Детгиз, 1957.

Книга о решении арифметических задач на практике. Содержит много кратких исторических сведений о великих математиках и задачах, которые они решали.

Тукачинский М. С. Как считают машины, Гостехиздат, 1955.

В доступной форме автор излагает основные принципы работы счетных машин. Этой же теме посвящена другая книжка того же автора:

Тукачинский М. С. Машины-математики, Гостехиздат, 1958.

Более детальное описание принципов устройства и работы различных вычислительных машин содержится в книгах:

Делоне Б. Н. Краткий курс математических машин, ч. 1, Гостехиздат, 1952.

Хренов Л. С. Малые вычислительные машины, изд. 2-е, Физматгиз, 1958.

Об устройстве счетной логарифмической линейки и о том, как с ней работать, рассказывается в книге:

Панов Д. Ю. Счетная линейка, изд. 13-е, Физматгиз, 1958.

Об элементах номографии и ее применениях имеется книга:

Пентковский М. В. Считающие чертежи, Гостехиздат, 1953.

По разделу «Фигуры и тела» рекомендуем следующие книги:

Александров П. С. Н. И. Лобачевский, Гостехиздат, 1944.

В этой книге содержатся две статьи. Одна из них посвящена биографии великого математика Николая Ивановича Лобачевского, а вторая статья излагает основы неевклидовой геометрии Лобачевского. Вторая статья издана также отдельной брошюрой:

Александров П. С. Что такое геометрия Лобачевского, Гостехиздат, 1954.

Неевклидовым геометриям посвящена также популярная книга:

Каган В. Ф. Лобачевский и его геометрия (общедоступные очерки), Гостехиздат, 1955.

Широков П. А. Краткий очерк основ геометрии Лобачевского, М., Гостехиздат, 1955.

Польский Н. И. О различных геометриях, Киев, 1957.

Материал, содержащийся в статье «Геометрия вокруг нас», расширяет брошюра:

Маркушевич А. И. Замечательные кривые, Гостехиздат, 1952.

О некоторых пространственных кривых линиях можно прочитать в книгах:

Люстерник Л. А. Кратчайшие линии, Гостехиздат, 1955.

Пархоменко А. С. Что такое линия, М., Гостехиздат, 1954.

Болтянский В. Г. Равновеликие и равносоставленные фигуры, Гостехиздат, 1956.

В книге рассматриваются вопросы разбиения равновеликих фигур и тел на части.

Штейнгауз Г. Математический калейдоскоп. Гостехиздат, 1949.

В этой книге собрано много ярких математических фактов, приведенных без доказательств, но с прекрасными иллюстрациями, взятыми из жизни.

По геометрии можно рекомендовать также следующие книги:

Смогоржевский А. С. Метод координат, Гостехиздат, 1952.

Эта книга примыкает по содержанию к статье «Что такое координаты и для чего они служат».

Дубнов Я. С. Ошибки в геометрических доказательствах, Гостехиздат, 1953.

В этой книге рассказывается о типичных ошибках, допускаемых учащимися в геометрических рассуждениях, а также рассказывается о так называемых софизмах, т. е. таких «доказательствах», где в замаскированном виде встречается логическая ошибка.

Фетисов А. И. О доказательствах в геометрии, Гостехиздат, 1954.

Эта книга, также как и предыдущая, способствует развитию правильного, логического мышления, необходимого для успешных занятий математикой.

Лопшиц А. М. Вычисление площадей ориентированных фигур, Гостехиздат, 1956.

Знакомит читателя с понятием площади ориентированной фигуры и с его применениями к теории планиметра и к измерению площади земельного участка.

Головина Л. И. и Яглом И. М. Индукция геометрии, М., Гос. изд. технико-теоретич. лит., 1956.

Книга посвящена разнообразным применениям метода математической индукции к решению геометрических задач.

О векторах на плоскости в популярной форме рассказывается в книге:

Фишман. Векторы на плоскости, Гостехиздат, 1940.

Различные интересные геометрические вопросы рассматриваются в книгах:

Зетель С. И. Геометрия линейки и геометрия циркуля, изд. 2-е, Учпедгиз, 1957.

Зетель С. И. Новая геометрия треугольника, Учпедгиз, 1940.

Люстерник Л. А. Выпуклые тела и многогранники, изд. 3-е, Гостехиздат, 1955.

Кордемский Б. А. и Русалев Н. В. Удивительный квадрат, Гостехиздат, 1952.

Для более подробного знакомства с основами дифференциального исчисления можно обратиться к книге:

Болтянский В. Г. Что такое дифференцирование, Гостехиздат, 1955.

В этой книге дается понятие производной функции и рассказывается о ее приложениях.

Об основных идеях, лежащих в основе интегрального исчисления, вы прочитаете в книгах:

Натансон И. П. Суммирование бесконечно малых величин, Гостехиздат, 1953.

Маркушевич А. И. Площади и логарифмы, Гостехиздат, 1952.

О решении задач на нахождение минимумов и максимумов можно прочитать в следующих книгах:

Натансон И. П. Простейшие задачи на максимум и минимум, Гостехиздат, 1950.

Зетель С. И. Задачи на максимум и минимум, Гостехиздат, 1948.

По разделу «Уравнения и функции» рекомендуем популярную книгу:

Маркушевич А. И. Ряды, Гостехиздат, 1957.

Шерватов В. Г. Гиперболические функции, М., Гостехиздат, 1954.

По разделу «Алгебра конечного и бесконечного» укажем следующую популярную литературу.

Баумгартнер Л. Теория групп, ОНТИ, 1934.

В этой книге популярно изложены основы теории групп. Этой же теме посвящена книга:

Александров П. С. Введение в теорию групп, Учпедгиз, 1956.

О разрешимости уравнений в радикалах и о близких вопросах к этой большой проблеме можно прочитать в книгах:

Окунев Л. Я. Проблема резольвент Чеботарева, Гостехиздат, 1949.

Школьник А. Г. Двучленные уравнения и задачи деления круга, Учпедгиз, 1940.

Курош А. Г. Алгебраические уравнения произвольных степеней, Гостехиздат, 1951.

О жизни и работе над созданием теории разрешимости уравнений в радикалах гениального французского математика Э. Галуа можно прочитать в книге, написанной выдающимся польским физиком Леопольдом Инфельдом:

Инфельд Л. Эварист Галуа-избранник богов, «Молодая гвардия», 1959.

Об одном методе приближенного решения уравнений произвольных степеней в доступной форме рассказывается в брошюре:

Шафаревич И. Р. О решении уравнений высших степеней (метод Штурма), Гостехиздат, 1954.

Рекомендуем также книги:

Дынкин Е. Б. и Успенский В. А. Математические беседы, Гостехиздат, 1952.

Яглом И. М. Геометрические преобразования, тт. I и II, Гостехиздат, 1955—1956.

Кузьмин О. Р. и Фаддеев А. Д. Алгебра и арифметика комплексных чисел, Гостехиздат, 1950.

По математической логике, а также по близким к ней вопросам, связанным с алгоритмами и кибернетикой, рекомендуем книги:

Кобринский Н. Е., Пекелис В. Д. Быстрее мысли. «Молодая гвардия», 1959.

Трахтенберг Б. А. Алгоритмы и машинное решение задач, М., Гостехиздат, 1957.

Градштейн И. С. Прямая и обратная теоремы, изд. 2-е, Гостехиздат, 1950.

Полетаев И. А. Сигнал, изд-во «Советское радио», 1958.

С основами теории вероятностей можно познакомиться по книге:

Гнеденко Б. В. и Хинчин А. Я. Элементарное введение в теорию вероятностей, изд. 2-е, Гостехиздат, 1950.

Некоторые вопросы истории математики рассмотрены в книгах:

Гнеденко Б. В. Очерки по истории математики в России, Гостехиздат, 1948.

Люди русской науки, Гостехиздат, 1950.

Вахтин Б. М. Великий русский математик Н. И. Лобачевский, М., Учпедгиз, 1956.

Депман И. Я. Возникновение системы мер и способов измерения величин, М., Учпедгиз, 1956.

Кольман Э. Бернард Больцано (1781—1848), М., изд. Академии наук СССР, 1955.

Лурье С. Я. Архимед, М., Академия наук СССР, 1945.

Марков Н. И. Лобачевский — великий русский ученый, М., «Знание», 1956.

Цейтен Г. Г. История математики в древности и в средние века, М.—Л., ОНТИ, 1938.

Цейтен Г. Г. История математики в XVI и XVII вв., М.—Л., ОНТИ, 1938.

Книги для внеклассного чтения по математике, посвященные различным вопросам этой науки:

Депман И. Я. Метод математической индукции, Л., Учпедгиз, 1957.

Соминский И. С. Метод математической индукции, М., Гостехиздат, 1956.

Дубнов Я. С. Ошибки в геометрических доказательствах, М., Гостехиздат, 1955.

Колосов А. А. Книга для внеклассного чтения по математике для учащихся VIII класса, М., Учпедгиз, 1958.

В этой книге читатель найдет дополнительный материал к тому, что он узнал на уроке. Рассказывается, как применить на практике знания, полученные на уроках математики, дается исторический материал. В конце каждой главы есть список литературы, которая поможет расширить математический кругозор учащегося.

Коровкин П. П. Неравенства, М., Гостехиздат, 1956.

Маркушевич А. И. Комплексные числа и конформные отображения, М., Гостехиздат, 1954.

Миракьян Г. М. Прямой круговой цилиндр, М., Гостехиздат, 1955.

Нагибин Ф. Ф. Математическая шкатулка, М., Учпедгиз, 1958.

Книга знакомит юного читателя с биографиями выдающихся советских и русских математиков. Интересен материал по истории математики, устному счету; дается понятие о графиках, «палочках Непера», счетных приборах и машинах и о математической логике. В книге много материала, который школьник может использовать на

практике: об измерениях на чертеже и на местности,— а также много задач и упражнений к каждой главе.

В перечисленных выше книгах излагаются в основном различные вопросы математической теории. Ниже приводится список книг, где читатель найдет большое количество интересных математических задач и примеров практического использования математики.

Кордемский Б. А. Математическая смекалка. Физматгиз, 1958.

Люстерник Л. А. Кратчайшие линии. Вариационные задачи, М., Гостехиздат, 1955.

Манзон Б. А. Сборник занимательных математических задач, игр и головоломок, Симферополь, Крымиздат, 1954.

Перельман Я. И. Занимательная арифметика. Загадки и диковинки в мире чисел, М., Детгиз, 1954.

Перельман Я. И. Занимательная алгебра, М., Гостехиздат, 1956.

Перельман Я. И. Занимательная геометрия, М., Гостехиздат, 1955.

Перельман Я. И. Живая математика, М., Физматгиз, 1959.

Перельман Я. И. Занимательные задачи, «Молодая гвардия», 1934.

Перельман Я. И. Вычисления с приближенными числами, М., изд-во АПН РСФСР, 1957.

Рымарев А. Ф. Сборник задач для внеклассных занятий по математике в V, VI классах средней школы, Минск, Учпедгиз БССР, 1957.

Шклярский Д. О., Ченцов Н. Н., Яглом И. М. Избранные задачи и теоремы элементарной математики, ч. I. Арифметика и алгебра, М., Гостехиздат, 1954.

Яглом А. М. и Яглом И. М. Неэлементарные задачи в элементарном изложении, М., Гостехиздат, 1954.

Указатель имен и предметов

А

Абак — счетная доска, употреблявшаяся в Древнем Риме и Древней Греции — 30, 56.

Абель, Нильс Генрик (1802—1829) — норвежский ученый, один из наиболее выдающихся математиков первой половины XIX в. Известен работами в области алгебры, интегрального исчисления и теории рядов — 123.

Адамс, Джон Кауч (1819—1892)— английский астроном и математик. Профессор астрономии в Кембриджском университете. Известен открытием планеты Нептун на основе математического анализа неправильностей в движении планеты Уран — 171.

Аксиома — предложение, принимаемое без доказательства. На основании аксиом по правилам математической логики доказываются теоремы — 92, 109.

Аксиома Лобачевского — через точку вне прямой в данной плоскости можно провести не менее двух прямых, не пересекающих данную прямую. Аксиома Лобачевского не выполняется в геометрии Евклида — 114.

Алгебра — одна из старейших математических дисциплин, возникшая из задач, приводящих к решению уравнений — 185.

Алгебраически замкнутое поле — поле, к которому принадлежат все корни многочленов с коэффициентами из этого поля — 190.

Алгебраическое число — корень многочлена с целочисленными коэффициентами — 189.

Алфавитные нумерации — такие способы записи чисел, в которых употребляются не цифровые знаки, а буквы алфавита. Например, на Руси в старину пользовались славянской нумерацией — 34.

Аль-Хорезми, Мухаммед ибн-Муса (IX в.) — среднеазиатский ученый, автор знаменитой книги по математике. От первого слова «алджебр» из заглавия этой книги произошло слово «алгебра» — 121, 126.

Аполлоний — древнегреческий математик, живший около 200 г. до н. э. Важнейшим трудом Аполлония являются его «Конические сечения» — 22, 40.

Аристотель (384—322 гг. до н. э.) — крупнейший древнегреческий ученый, создатель науки логики — 91.

Арифметика — одна из старейших математических дисциплин, изучающая основные свойства чисел и действий над ними — 196.

Архимед (ок. 287—212 гг. до н. э.) — величайший математик и механик древности. Известен работами в различных областях науки — 22, 35.

Ассоциативность (сочетательность) — свойство некоторых математических операций. Например, закон ассоциативности сложения имеет вид $(a+b)+c = a+(b+c)$—191, 192.

Б

Бёрнсайд, Уильям (1852—1927) — английский математик-алгебраист, профессор Морского колледжа в Гринвиче. Основные труды относятся к теории групп — 195.

Бернулли, Якоб (1654—1705) — выдающийся швейцарский математик, сделавший исключительно важные открытия в теории вероятностей, в математическом анализе и других областях математики и физики — 217.

Бернштейн, Сергей Натанович (р. 1880) — советский математик, академик. Основные труды относятся к дифференциальным уравнениям, теории приближений функций и теории вероятностей — 218.

Бесконечное множество — множество, не являющееся конечным множеством. Бесконечное множество всегда содержит часть, являющуюся счетным множеством — 202.

Бомбелли, Рафаэль — итальянский математик и инженер второй половины XVI в. Известен исследованием уравнения 3-й степени — 123.

Бойай, Янош (1802—1860) — выдающийся венгерский математик. Независимо от Н. И. Лобачевского и несколько позднее его пришел к открытию неевклидовой геометрии —98.

Бхаскара или Бхаскара-акариа (т. е. ученый Бхаскара) (р. 1114— год смерти неизвестен) — индийский математик и астроном. Основной труд «Венец системы» (ок. 1150 г.) содержит изложение ряда вопросов, неизвестных еще в то время в Европе — 122.

В

Варинг, Эдуард (1736—1798) —английский математик, профессор Кембриджского университета. Известен работами по алгебре, алгебраическим кривым и теории чисел—48.

Вектор — величина (сила, скорость и т. д.), характеризуемая не только числовым значением, но и направлением. Векторы изображаются направленными отрезками, т. е. отрезками, у которых указаны начало и конец — 173, 191

Вероятность события—устойчивая частота наступления события при многократных повторениях опыта—214.

Взаимно-однозначное соответствие (или отображение) — такое отношение между двумя множествами A и B, при котором с каждым элементом множества A сопоставлен один и только один элемент множества B, причем любой элемент множества B оказывается сопоставленным некоторому элементу множества A— 204.

Взаимно-простые числа — целые числа, имеющие наибольший общий делитель, равный 1—204.

Виет (или Вьет), Франсуа (1540—1603) — выдающийся французский математик. Известен работами по алгебре и тригонометрии —121.

Виноградов, Иван Матвеевич (р. 1891)— крупный советский математик, академик, известен работами по теории чисел. Виноградову принадлежит решение проблемы Гольдбаха и другие важные результаты —48.

Возвратное уравнение — уравнение вида

$$a_0x^n + a_1x^{n-1} + \ldots + a^{n-1}x + a^n = 0,$$

где $a_k = a_{n-k}$ при $k=0, 1, 2, \ldots, n$—124.

Вращение — такое движение, при котором одна точка O остается неподвижной, а всякая другая точка A переходит в точку A', такую, что $\angle A'OA$ постоянен для всех точек A —103.

Вторая производная — производная от (первой) производной—170.

Высота положительного рационального числа — сумма $a+b$, в предположении, что рациональное число записано в виде несократимой дроби $\frac{a}{b}$ — 207.

Вычет по модулю m — остаток r от деления некоторого числа a на модуль m, или на число, отличающееся от r слагаемым, кратным m, т. е. на $r+q\cdot m$—197.

Сычитание векторов — действие над векторами, обратное сложению векторов—179.

Г

Галуа, Эварист (1811—1832) — французский математик, заложивший основы современной алгебры, в частности теории групп— 123, 195.

Гамильтон, Уильям Роуан (1805—1865) — ирландский математик. Профессор Дублинского университета. Президент Ирландской академии наук. Известен работами в области алгебры и математического анализа —124.

Гаусс, Карл Фридрих (1777—1855) — крупнейший немецкий математик, внесший существенный вклад в развитие ряда разделов теоретической математики и ее приложений—123, 189, 190, 218.

Гельфонд, Александр Осипович (р. 1906) — советский математик, специалист в области теории чисел, профессор Московского университета, член-корреспондент Академии наук СССР — 48, 189.

Геодезическая линия — линия наикратчайшего расстояния на поверхности —115.

Геометрия Лобачевского — геометрическая система, в которой принимается за исходное положение аксиома Лобачевского о параллельных прямых, а остальные аксиомы одинаковы для геометрии Евклида и геометрии Лобачевского — 93, 114.

Гервин — австрийский офицер, занимавшийся исследованиями в области математики. Независимо от Бойай доказал теорему о равносоставленности равновеликих многоугольников —98.

Герон (вероятно, I в. до н. э.) — выдающийся греческий инженер и ученый. Известен работами по механике и прикладной математике — 124.

Гильберт, Давид (1862—1943) — немецкий математик, творчество которого оказало значительное влияние на развитие математики в XX в., профессор университета в Гёттингене — 48, 109.

Гипербола — геометрическое место точек на плоскости. Разность расстояний от любой из них до двух точек, называемых фокусами, постоянна —86.

Гиперболоид — одна из поверхностей второго порядка. Гиперболоид вращения возникает от вращения гиперболы —86, 125.

Гомотетия — такое отображение подобия, при котором остается неподвижной одна точка — центр гомотетии O. Таким образом, если точка A переходит в A', то отношение $\frac{OA'}{OA}=k$, где k — постоянное для всех точек A число, называемое коэффициентом гомотетии —103.

Группа — множество, для элементов которого определена одна алгебраическая операция, подчиненная определенным законам —192.

Д

Д'Аламбер, Жан Лерон (1717—1783) — французский математик и философ, член Парижской академии наук — 190.

Движение — отображение, меняющее положение фигуры, но сохраняющее ее форму и размеры —101.

Двоичная система счисления — позиционная система счисления с основанием, равным 2. В двоичной системе счисления всего две цифры — 0 и 1—26,72.

Действительное число — конечная или бесконечная десятичная дробь —189.

Декарт, Рене (1596—1650), латинизированное имя Картезий — выдающийся французский философ, математик и физик. Один из создателей аналитической геометрии — 121, 123, 124, 126.

Делитель (какого-либо целого числа) — целое число, на которое данное число делится без остатка—198.

Делоне, Борис Николаевич (р. 1890) — советский математик, специалист в области теории чисел, профессор сначала Ленинградского, а затем Московского университетов, член-корреспондент Академии наук СССР — 47.

Диофант (вероятно, III в.) — древнегреческий математик, открывший способы решения некоторых уравнений, в основном неопределенных. Основной его труд «Арифметика» явился отправной точкой для развития теории чисел Ферма, Эйлером и Гауссом — 122, 124.

Дискриминант квадратного уравнения $ax^2+bx+c=0$ это число $\Delta=b^2-4ac$. В зависимости от знака дискриминанта уравнение имеет действительные или комплексные корни —124.

Дистрибутивность (распределительность)— свойство некоторых операций. Например, умножение чисел дистрибутивно относительно сложения. Закон дистрибутивности имеет вид $(a+b)c=ac+bc$—190.

Дифференциальное уравнение — уравнение, в котором содержатся производные функции от искомой функции—169.

Дифференцирование — нахождение производных и дифференциалов —164.

Е

Евклид (III в. до н. э.) — крупнейший древнегреческий математик из Александрии. Основной труд — «Начала», который сыграл колоссальную роль в развитии математики —92, 107, 109, 118.

Египетский треугольник — прямоугольный треугольник со сторонами, равными 3, 4 и 5—41.

Ж

Жирар, Альбер (1595—1632) — голландский математик. Известен работами по алгебре и тригонометрии —23.

Жордан, Мари Энмон Камиль (1838—1922) — французский математик, член Парижской академии наук и ее президент, был членом-корреспондентом Академии наук в России. Широкую известность получили работы Жордана в области алгебры, теории функций, топологии и кристаллографии — 195.

И

Инверсия (относительно окружности S) — геометрическое преобразование, при котором каждая точка A переходит в точку A' луча OA так, что $\overline{OA}\cdot\overline{OA'}=r^2$, где O — центр и r — радиус окружности S. Инверсия является круговым преобразованием —106.

Интеграл (определенный) от функции на отрезке от a до b — предел интегральных сумм для функции при безграничном увеличении числа разбиений отрезка $[a;\ b]$ и при стремлении их длин к нулю —156.

Интегральные суммы для функции $f(x)$, определенной на отрезке от a до b — суммы вида $f_1(x)(x_1-x_0)+f(x_2)(x_2-x_1)+\ldots+f(x_n)(x_n-x_{n-1})$, где $a=x_0<x_1<\ldots<x_{n-1}<x_n=b$, т. е. x_0 и x_n — концы рассматриваемого отрезка, а $x_1,\ x_2,\ \ldots,\ x_{n-1}$ — точки этого отрезка —156.

Интегрирование — нахождение интегралов —158.

Интервал (на числовой оси)—множество действительных чисел x, бо́льших числа a и меньших числа b $(a<b)$; интервал обозначается символом $(a,\ b)$—208.

К

Кантор, Георг (1845—1918) — немецкий математик. Профессор университета в Галле. Создатель теории множеств —207.

Кардано, Джероламо (1501—1576) — итальянский математик и механик. Известен работами в области алгебры и теории рычагов (карданный вал) —123.

Касательная к кривой в точке M — прямая, к которой приближается секущая MN, когда точка N приближается (по рассматриваемой кривой) к M — 162.

Квадратичная иррациональность — число вида $a+b\sqrt{c}$, где a, b и c — рациональные числа, но c не является квадратом рационального числа —187.

Квадрирование — один из способов измерения площадей фигур, в основе которого лежит идея заполнения фигуры квадратиками —97.

Кеплер, Иоганн (1571—1630) — выдающийся немецкий астроном (см. статью «Иоганн Кеплер» в т. 2 ДЭ) —153.

Клейн, Феликс (1849—1925) — немецкий математик. Основные работы посвящены неевклидовой геометрии, теории непрерывных групп, теории алгебраических уравнений и др.—106.

Колмогоров, Андрей Николаевич (р. 1903) — советский математик, академик. Известен работами в различных областях математики —218.

Кольцо — множество математических объектов, для которых определены операции сложения и умножения, подчиненные определенным законам —190.

Коммутативность (переместительность) — свойство некоторых операций. Закон коммутативности сложения, например, имеет вид: $a+b=b+a$ —193.

Комплексное число — число вида $a+bi$, где a и b— действительные числа, а $i=+\sqrt{-1}$—190.

Конечное множество — множество, составленное лишь из конечного числа предметов (элементов). Конечное множество, в отличие от бесконечного, характеризуется тем, что любое его подмножество (не совпадающее со всем множеством) не может быть приведено во взаимно-однозначное соответствие с самим множеством —202.

Континуум-гипотеза — гипотеза, высказанная немецким математиком Г. Кантором, о том, что любое несчетное множество действительных чисел имеет ту же мощность, что и множество всех действительных чисел. До настоящего времени это утверждение не доказано и не опровергнуто —210.

Круговое преобразование — преобразование, переводящее всякую окружность в окружность (при этом прямая считается окружностью бесконечно большого радиуса) —106.

Кубирование — один из способов измерения объемов тел, идея которого состоит в заполнении тела кубами —100.

Кубическая парабола— одна из кривых третьего порядка. Ее уравнение $y=x^3$ —87.

Л

Лагранж, Жозеф Луи (1736—1813) — выдающийся французский математик и механик, член Парижской академии наук, был членом и президентом Берлинской академии наук. Наиболее важные работы Лагранжа относятся к математическому анализу и теоретической механике —47, 48, 194.

Лаплас, Пьер Симон (1749—1827) — выдающийся французский астроном, математик и физик, член Парижской академии наук —40, 213, 217.

Лейбниц, Готфрид Вильгельм (1646—1716) — знаменитый немецкий математик и философ —49, 62, 123, 167.

Лемниската — одна из кривых четвертого порядка —87.

Леонардо Пизанский (Фибоначчи) (р. ок. 1170 — ум. после 1228) — итальянский математик. Одним из первых в Европе ввел в употребление индийские цифры — 27, 122, 124.

Линдеман, Фердинанд (1852—1939) — немецкий математик, профессор в Кенигсберге и Мюнхене —189.

Линейное преобразование — такое отображение, при котором всякая прямая преобразуется в прямую — 104.

Линия — абстрактное понятие, являющееся отвлечением от реальных физических образов, таких, как траектория движущегося тела и т. д.—130.

Лобачевский, Николай Иванович (1792—1856) — великий русский математик, создатель неевклидовой геометрии, носящей сейчас его имя. Ректор Казанского университета —93, 118, 124.

Логарифмическая линейка — счетный прибор для приближенных вычислений —59.

Логарифмическая шкала — один из видов шкал. Строится логарифмическая шкала следующим образом. Выбрав некоторую единицу масштаба E (модуль шкалы), откладывают отрезки, равные $E\ln x$, для различных значений $x=x_1, x_2, \ldots$ и над концами соответствующих отрезков ставят отметки, равные аргументу $x_1, x_2, \ldots$ Логарифмическая шкала используется на счетной логарифмической линейке, в номографии и т. д.—59.

Ляпунов, Александр Михайлович (1857—1918) — выдающийся русский математик и механик, академик. Известен работами в области математического анализа и теории вероятностей — 128.

М

Магницкий, Леонтий Филиппович (1669—1739) — автор первого систематического учебника по математике на русском языке (издан в 1703 г. в Москве), сыгравшего очень большую роль в деле развития культуры нашей Родины —120.

Марков, Андрей Андреевич (1856—1922) — выдающийся русский математик, академик. Известен работами по теории чисел, теории вероятностей и математическому анализу —218.

Метод ложного положения — один из древнейших методов решения арифметических задач — 119.

Метод рассеивания — один из способов решения неопределенных уравнений в целых числах. Был предложен индийскими математиками раннего средневековья —43.

Многогранник — геометрическое тело, ограниченное плоскими поверхностями — гранями многогранника —84.

Многоугольник — плоская геометрическая фигура, ограниченная отрезками — сторонами многоугольника —97.

Множество — совокупность некоторых предметов, называемых элементами этого множества —192.

Модуль шкалы — единица масштаба на функциональной шкале —60.

Мощность — характеристика количественно эквивалентных множеств, т. е. множеств, между которыми может быть установлено взаимно-однозначное соответствие —208.

Мультипликативный принцип — основа одного из возможных способов записи чисел в непозиционной системе счисления —34.

Н

Направленный отрезок — отрезок прямой, на которой выбрано направление, положительное в одну сторону и отрицательное в другую. Направленные отрезки поэтому тоже могут быть положительными и отрицательными —173.

Натуральный логарифм — логарифм, основанием которого является число Непера $e\approx 2{,}71828\ldots$ Натуральный логарифм числа a обозначается так: $\ln a$ — 141.

Натуральные числа — целые положительные числа 1, 2, 3, 4,... Совокупность всех натуральных чисел называют натуральным рядом чисел — 203.

Начало координат — точка пересечения осей координат, т. е. оси абсцисс и оси ординат —126.

Неевклидовы геометрии — геометрические системы, в которых одна или несколько аксиом обычной геометрии Евклида заменены другими аксиомами, не выполняющимися в евклидовой геометрии —114.

Некоммутативная группа — группа, в которой операция не подчинена закону коммутативности (переместительности)—193.

Неопределенное уравнение — уравнение, имеющее бесчисленное множество решений, например уравнение $x+y=3$. Неопределенным уравнением называют также уравнение, содержащее более одного неизвестного —42.

Непер, Джон (1550—1617) — шотландский математик, изобретатель логарифмов —57.

Неприводимый многочлен — многочлен, который нельзя представить в виде произведения двух многочленов с коэффициентами из того же поля и степеней не ниже первой — 190.

Несоизмеримые отрезки — отрезки, не имеющие общей меры. Простейшие несоизмеримые отрезки — диагональ и сторона квадрата —91.

Несчетное множество — бесконечное множество, не являющееся счетным. Множество всех действительных чисел является несчетным множеством — 207.

Нуль-вектор — особый вектор, у которого совпадают конец и начало, ввиду чего он не имеет определенного направления —176.

Объем тел — положительные числа, сопоставленные телам по определенным правилам измерения объемов —99.

Однер В. Т. — петербургский инженер. В 1874 г. изобрел арифмометр —62.

Окаймляющий многоугольник — многоугольник, содержащий внутри себя заданный многоугольник —98.

Окружность — геометрическое место точек на плоскости, равноудаленных от определенной точки, называемой центром окружности—85, 103.

Основная теорема алгебры гласит, что любое алгебраическое уравнение имеет в поле комплексных чисел хотя бы один корень — 190.

Остаток — такое число r, что при делении целого числа a на целое число b выполнены два условия:

$$1)\ a=bq+r \text{ и } 2)\ 0\geqslant r<|b|.$$

Здесь q — неполное частное от деления с остатком —196.

Ось — направленная прямая, т. е. прямая с указанным на ней направлением —105, 126.

Ось абсцисс — горизонтально направленная прямая с указанным на ней положительным направлением (слева направо) и выбранной единицей масштаба —126.

Ось ординат — вертикально направленная прямая с указанным на ней положительным направлением (снизу вверх) и выбранной единицей масштаба —126.

Отображение (в геометрии) — закон, по которому каждой точке некоторой фигуры сопоставляется определенная точка другой или той же самой фигуры. Отображение подобия — отображение (или преобразование) фигуры, изменяющее только размеры фигуры, но сохраняющее ее форму —100.

Парабола — геометрическое место точек на плоскости, равноудаленных от определенной точки, называемой фокусом параболы, и определенной прямой, называемой директрисой — 85, 160.

Парабола 4-й степени — кривая линия, имеющая уравнение $y=ax^4$ — 88.

Параболоид — одна из поверхностей второго порядка — 85.

Параллелепипед—тело, образованное пересечением трех пар соответственно параллельных плоскостей — 83, 125.

Параллельное проектирование — такое преобразование (или отображение) некоторой плоскости, при котором каждая ее точка A переходит в точку другой плоскости A' так, что прямые AA' для всех точек A параллельны — 104.

Параллельный перенос — такое движение, при котором все отрезки, соединяющие всякие две соответствующие точки, имеют одно и то же направление и одну и ту же длину — 101.

Параллельные прямые — в геометрии Евклида параллельными прямыми называются всякие две прямые, лежащие в одной плоскости и не имеющие общих точек — 110.

Паскаль, Блез (1623—1662) —выдающийся французский математик, физик и философ — 62, 215, 217.

Первообразная функция — функция, производная от которой равна заданной функции — 167.

Переместительный закон сложения — свойство сложения, состоящее в том, что $a+b=b+a$. Переместительный закон называют также коммутативным законом. Переместительный закон верен не только для сложения чисел, но и для сложения векторов, функций и т. д. — 192.

Переходная кривая — кривая линия, по форме которой сгибают рельс на поворотах — 87.

Перфокарта — картонная карточка стандартной формы, посредством которой кодируют информацию в счетно-аналитических машинах — 76.

Пифагор (р. ок. 580 г.— ум. в 500 г. до н. э.) — древнегреческий математик и философ. Основал в г. Кротоне философскую школу — 41, 90, 107.

Пифагоров треугольник—прямоугольный треугольник, стороны которого выражены целыми числами — 41.

Плоскость — одно из основных математических понятий. Определения для плоскости не дается. Свойства плоскостей раскрываются аксиомами — 83, 84, 108.

Площади фигур — положительные числа, сопоставляемые фигурам с выполнением определенных правил — 95.

Подмножество — множество, составленное из части предметов (элементов) данного множества — 205.

Подстановка — замена элементов $A_1, A_2, \ldots, A_n$ этими же элементами, но в другом порядке. Множество всех подстановок образует группу — 194.

Позиционные или поместные системы счисления — системы записи чисел, в которых строго учитывается место (позиция), занимаемое цифровым знаком — 25, 37.

Показательная функция — функция вида $y=a^x$, где a — некоторое положительное число — 141.

Постулат — то же, что и аксиома — 92.

Правило середины — один из способов сложения векторов — 175.

Правильный многоугольник — многоугольник, у которого все стороны равны и все внутренние углы при вершинах равны. Правильных многоугольников бесконечно много —83.

Признаки делимости — правила, по которым можно установить, делится ли одно число на другое или нет, не производя самого деления —199.

Производная от функции — предел отношения приращения функции к приращению аргумента когда приращение аргумента стремится к нулю — 164.

Простаферетический способ умножения — состоит в том, что умножение заменяется сложением, опираясь на тождество

$$\frac{(a+b)^2}{4}-\frac{(a-b)^2}{4}=ab$$

и на аналогичные тождества — 55.

Простое число — натуральное число, большее 1 и делящееся только на 1 и на самое себя. Простые числа иногда называют первоначальными числами — 48.

Прямая (линия) — одно из основных понятий геометрии. Определения для прямой линии не дается. Свойства прямых линий раскрываются аксиомами — 107.

Псевдосфера — поверхность, получаемая вращением кривой линии, называемой трактрисой — 115, 125.

Пуассон, Симеон Дени (1781—1840) — выдающийся французский механик, физик и математик, член Парижской академии наук, почетный член Петербургской академии наук — 218.

Равно-противоположные векторы — два вектора, изображаемые равными по длине параллельными отрезками с противоположными направлениями. Сумма взаимно-противоположных векторов есть нуль-вектор —176.

Расширение поля — поле, полученное из другого поля путем присоединения новых элементов — 187.

Рациональное число — отношение двух целых чисел a к b, где $b \neq 0$ — 46, 186.

Риман, Георг Фридрих Бернхард (1826—1866) — выдающийся немецкий математик. Профессор математики в Гёттингенском университете. Работы Римана оказали большое влияние на развитие математики второй половины XIX в. в особенности в области неевклидовой геометрии — 93, 115.

Секущая линия кривой — прямая, имеющая с данной кривой не менее двух общих точек — 162.

Сжатие к прямой l — отображение (или преобразование), при котором каждая точка A переходит в точку A' перпендикуляра, опущенного на l из A, так, что отношение расстояния от A' до l к расстоянию от A до l изменяется k раз, где k — постоянное число. Если $k>1$, то получаем, строго говоря, «растяжение от прямой l», а не сжатие, но для удобства формулировок этот случай тоже принято считать «сжатием» — 104.

Симметричные точки — точки, соответствующие друг другу при симметрии. Симметричные точки при осевой симметрии лежат на перпендикуляре к оси симметрии по разные стороны от нее и на равном расстоянии от нее. При центральной симметрии симметричные точки лежат на прямой, проходящей через центр симметрии и на равном расстоянии от него — 101.

Синусоида — график тригонометрической функции $y=\sin x$ — 145.

Сложение векторов — действие над векторами. Сумма двух векторов, не лежащих на одной прямой, получается как диагональ параллелограмма, построенного на этих двух векторах — 175.

Сорубан — древний японский счетный прибор, похожий на русские счеты — 56.

Сочетательный закон сложения — свойство сложения, состоящее в том, что $(a+b)+c=a+(b+c)$. Сочетательный закон называют также ассоциативным законом. Сочетательный закон верен не только для сложения чисел, но и для сложения векторов, функций и т. д — 177.

Спектральный анализ (в математике) — разложение графика периодического колебательного процесса на синусоидальные составляющие. Спектральный анализ называют также спектральным разложением —151.

Сравнимые числа — числа a и b называются сравнимыми или равноостаточными по модулю, если при делении с остатком чисел a и b на m остатки получаются равными. Сравнимость чисел записывают так: $a \equiv b (\mathrm{mod}\ m)$ — 197.

Средняя линия трапеции — отрезок, соединяющий середины двух боковых сторон трапеции — 183.

Суан-пан — древний китайский счетный прибор, напоминающий русские счеты — 56.

Сферический треугольник — треугольник на сфере, образованный дугами трех больших окружностей, т. е. окружностей, имеющих радиусы, совпадающие с радиусом сферы. Сумма внутренних углов сферического треугольника больше 180° — 23, 115.

Счетное множество — множество, которое можно поставить во взаимно-однозначное соответствие с множеством всех натуральных чисел — 206.

Тарталья, Николло (ок. 1499—1557) — итальянский математик. Известен работами в различных областях математики и ее приложений. Открыл способ решения уравнений 3-й степени — 123.

Теорема — математическое предложение, которое доказывается на основании аксиом — 109.

Теория вероятностей — отрасль математики, изучающая закономерности случайных явлений — 214

Топологические свойства фигуры — свойства фигуры, не изменяющиеся ни при каких непрерывных деформациях — 106.

Топология — отрасль математики, изучающая топологические свойства фигур — 106.

Тор — поверхность, получаемая вращением окружности вокруг прямой, лежащей в плоскости окружности и не пересекающей ее — 86.

Точка — одно из основных понятий в геометрии. Определения для точки не дается. Свойства точек раскрываются аксиомами — 107.

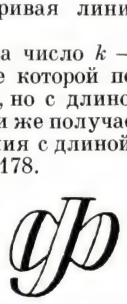
Трансцендентное число — неалгебраическое число, т. е. число, не являющееся корнем ни для какого многочлена с целочисленными коэффициентами—189.

Триангуляция — один из способов измерения площади многоугольников, сводящийся к разбиению многоугольника на треугольники и измерению их площадей — 97.

Трисекция угла — задача о делении угла на три равные части. С помощью только циркуля и линейки трисекция невозможна — 139.

Улитка Паскаля — кривая линия четвертого порядка — 139.

Умножение вектора на число k — операция над вектором, в результате которой получается вектор того же направления, но с длиной, измененной в k раз (в случае $k > 0$), или же получается вектор противоположного направления с длиной, измененной в $-k$ раз (в случае $k < 0$) — 178.



Ферма, Пьер (1601 — 1665) крупный французский математик, внесший значительный вклад в развитие ряда ее отраслей — 48, 201, 217.

Феррари, Лодовико (1522 — 1565) итальянский алгебраист. Нашел способ решения в радикалах уравнения 4-й степени — 123.

Ферро, Даль Ферро, Сципион (1465—1526) — итальянский математик, профессор математики в Болонском университете. С именем Ферро связано решение уравнений 3-й степени в радикалах — 123.

Формула Герона — формула для вычисления площади треугольника $S_\Delta = \sqrt{p(p-a)(p-b)(p-c)}$. Здесь a, b и c — стороны треугольника, а p — половина периметра — 51.

Формула Ньютона — Лейбница — формула, указывающая связь определенного интеграла с неопределенным — 167.

Функция — зависимость некоторой величины от других величин. Понятие функции является одним из важнейших в математике —141.

Хайям, Омар (ок. 1040— 1123) — выдающийся таджикский математик, философ и поэт — 123.

Хорда — отрезок, соединяющий две произвольные точки кривой или поверхности — 105.

Целочисленный треугольник — треугольник, длины сторон которого выражаются целыми числами — 41.

Центр окружности — точка, равноудаленная от всех точек окружности — 106.

Цепная линия — линия, по которой провисает тяжелая нерастяжимая нить — 87.

Циклоида — кривая линия, являющаяся следом точки окружности, катящейся без скольжения по прямой. Различают также укороченные и удлиненные циклоиды — 88.

Частота события — отношение числа благоприятного исхода опытов (числа наступления события) к общему числу проведенных испытаний — 213.

Чебышёв, Пафнутий Львович (1821—1894) — великий русский математик и механик, академик Петербургской и многих иностранных академий наук. Чебышёву принадлежат очень глубокие результаты в теории чисел, теории вероятностей, теории механизмов и других областях математики — 218.

Число Непера — число e, равное $\lim\limits_{n\to\infty}\left(1+\frac{1}{n}\right)^n$.

Число e — иррационально и приближенно равно 2,718281828459... Число Непера играет в математике большую роль и в частности служит основанием для натуральных логарифмов — 141.

Числовое поле — множество чисел, состоящее более чем из одного числа, в котором выполнимы четыре действия: сложение, вычитание, умножение и деление (кроме деления на нуль) —186.

Эволюта кривой линии — геометрическое место центров кривизны некоторой кривой L. Сама кривая L по отношению к своей эволюте является эвольвентой — 88.

Эйлер, Леонард (1707 — 1783) — великий математик, механик и физик, член Петербургской академии наук — 48, 123.

Эквивалентные множества — множества, между которыми можно установить взаимно-однозначное соответствие — 208.

Эллипс — геометрическое место точек на плоскости, в котором сумма расстояний от любой из них до двух точек, называемых фокусами эллипса, постоянна — 84, 88.

Эллипсоид — одна из поверхностей второго порядка. Эллипсоид вращения возникает при вращении эллипса вокруг одной из его осей — 89, 105, 125.

Условные обозначения и сокращения

МАТЕМАТИЧЕСКИЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ

∞ — бесконечность
$>$ — больше
$\geqslant$ — больше или равно (не меньше)
$\int$ — интеграл (неопределенный)
$\int\limits_a^b$ — интеграл определенный, с нижним пределом a и верхним пределом b
lg — логарифм десятичный
ln — логарифм натуральный
$\log_a b$ — логарифм при основании a числа b
$<$ — меньше
$\leqslant$ — меньше или равно (не больше)
mod — модуль
$\parallel$ — параллельно
$\perp$ — перпендикулярно
const — постоянная
lim — предел
$\approx$ — приближенно равно
Δ — приращение
% — процент
$\longrightarrow$ — стремится к
Σ — сумма
$\equiv$ — тождественно или тождественно равно
$\triangle$ — треугольник
$\angle$ — угол
$f(\,)$, $F(\,)$ — функция одного или нескольких переменных

ГРЕЧЕСКИЙ АЛФАВИТ

Aα альфа	Nν ни
Bβ бета	Ξξ кси
Γγ гамма	Oο омикрон
Δδ дельта	Ππ пи
Eε эпсилон	Pρ ро
Zζ дзета	Σσς сигма
Hη эта	Tτ тау
Θϑ тэта	Υυ ипсилон
Iι йота	Φφ фи
Kκ каппа	Χχ хи
Λλ ламбда	Ψψ пси
Mμ ми	Ωω омега

Вещество и Энергия

МЕСТО ФИЗИКИ СРЕДИ ДРУГИХ НАУК О ПРИРОДЕ

Физика!.. Это слово хорошо знакомо каждому школьнику — ведь это один из основных учебных предметов. Многие любят физику и не только с интересом слушают объяснения учителя на уроках, но и с увлечением занимаются в школьных физических кружках. Правда, есть ученики, которым школьный курс физики кажется сухим и неинтересным. Не будем спорить с ними: ведь для того, чтобы судить о каком-нибудь предмете, нужно прежде всего его хорошо знать. А не каждый школьник знает, насколько многообразна физика, какое огромное количество явлений природы изучает эта наука.

Попытайтесь в нескольких словах определить, что изучает физика. Вряд ли вам это удастся. В других случаях это как будто проще. Вот, например, астрономия изучает различные небесные тела — планеты, звезды, туманности. Биология — это наука о живом мире: растениях и животных. География изучает поверхность Земли, геология — ее недра, и т. д. А физика?

Попробуем разобраться в этом вопросе, который оказывается совсем не таким простым, как можно было сначала подумать.

Возьмем такой пример.

Нас интересует рост растений. На первый взгляд это не имеет ни малейшего отношения к физике. Немного терпения! Изучение роста и развития растений может ограничиться подробным описанием внешних событий: как быстро увеличивается размер листьев, каким темпом возрастает толщина ствола, как образуется цветок и т. д. Это не физика. Можно,

как это делают агрономы, заинтересоваться влиянием солнечных лучей и удобрений или обильности поливки на скорость роста и развития растения. В решении этих важных вопросов также нет физики. Однако при изучении роста растений перед вдумчивым исследователем возникает много разных «почему» совсем другого рода. Почему вода поднимается вверх по стеблю растения и способна добраться до верхушки самой высокой сосны? Почему листья зелены весной и летом, а осенью желтеют? Какую роль играют в жизни растения солнечные лучи и влага и каким образом растение выделяет кислород?

Так же обстоит дело и со многими другими науками. В качестве еще одного примера можно взять астрономию.

Астрономы изучают звезды. Они составляют звездные карты, разбивают звезды на группы по их яркости, размерам или расстоянию от Солнца. Во всем этом физики нет. Однако, изучая звезды, астроном, как и ботаник, неизбежно должен будет поставить перед природой ряд вопросов: почему светятся звезды? Чем объясняется, что большинство звезд состоит из легких элементов — водорода и гелия? Как связано с жизнью звезд приходящее к нам из Вселенной космическое излучение?

Найти ответы на эти и многие другие вопросы, возникающие у ботаников, астрономов, геологов и ученых многих других специальностей, — значит показать, каким общим законам природы подчиняется изучаемое нами явление.

Задача физики и состоит в том, чтобы найти эти общие законы, объяснить с их помощью все, что происходит вокруг нас в природе, и поставить их на службу научному предвидению. Без знания общих законов природы, без умения их применять для предсказывания еще не открытых явлений человек не мог бы сделаться хозяином природы.

Применение методов исследования, разработанных физиками, оказывается чрезвычайно плодотворным и в других, смежных с физикой науках: в биологии, геологии, химии и др. Так, привлекая к решению задач биологии физические и математические методы исследования, ученые закладывают основу новой увлекательной и многообещающей науки — биофизики. А ответы на многие вопросы, возникающие при изучении недр Земли, океанов, морей, окружающей ее атмосферы, дает геофизика.

Изучением возможности и быстроты протекания различных химических реакций (с точки зрения общих законов природы) занимается химическая физика. Основы важнейших технических дисциплин — металлургии, энергетики, технологии — являются областью технической физики.

Основы физики как науки были впервые заложены в работах итальянского ученого XVII в. Галилео Галилея. Этого замечательного человека и ученого можно назвать основоположником физики.

Конечно, еще древние китайцы, вавилоняне, египтяне и греки накопили ценные сведения по отдельным вопросам физики. Однако это были лишь случайные и несистематизированные данные. Мы находим у древних ряд правильных описаний фактов, но их научное толкование вызывает у современного человека глубокое удивление. Дело в том, что для науки древних было характерно стремление к объяснению всего мира, исходя из немногих «чистых идей». Там, где в основу рассуждения можно было положить ясные и отчетливые исходные данные — аксиомы (например, в геометрии), древним мыслителям удавалось приходить к правильным результатам и даже дать миру блестящие доказательства силы логического мышления. Однако в тех случаях, когда основные законы не являлись самоочевидными, попытки оставаться в рамках «чистых идей» не могли привести, конечно, к правильному пониманию физического мира.

Характерной в этом отношении является «Физика» Аристотеля, заполненная рассуж-

дениями, с которыми нельзя согласиться с позиций современной науки.

Вот одно из таких рассуждений о физических явлениях, которое мы находим у Аристотеля. Древнегреческие мыслители много спорили о том, как будут падать тела в пространстве, из которого удален воздух. Одни говорили, что тяжелые тела должны падать быстрее, чем легкие, и приводили «убедительные» доводы в пользу такого мнения; другие утверждали обратное. Аристотель соглашается с тем, что в вакууме (пустоте) все тела, как тяжелые, так и легкие, должны падать одинаково быстро. Из этого, однако, он делает неожиданный вывод: «...падение разных тел с одинаковой скоростью настолько абсурдно, что очевидна невозможность существования вакуума».

Галилей был первым мыслителем, который ясно понял, что закономерности поведения физических тел нельзя вывести с помощью «чистых идей», что их следует устанавливать опытным изучением природы. Физический опыт (эксперимент) — это вопрос, поставленный природе. Если вопрос поставлен правильно, то природа на него ответит.

Сбрасывая тела различного веса с большой высоты, Галилей пришел к выводу, что время их падения не зависит от веса. Так он на опыте установил важный закон природы. Найти его можно было только путем эксперимента. Никакими логическими рассуждениями нельзя доказать то обстоятельство, что тела падают с одинаковой скоростью независимо от их веса.

Опыт лежит в основе физики, но это не значит, что он — единственный способ познания физической истины. По мере накопления опытных фактов возникает потребность в их рассмотрении с единой, общей точки зрения. Эта задача решается с помощью математических методов и логических рассуждений.

Пример поможет нам понять их роль в физике. Все тела, вне зависимости от своего веса, одинаково падают на Землю; все маятники одинаковой длины колеблются одинаково, независимо от их массы; Луна вращается вокруг Земли, а Земля — вокруг Солнца по неизменным орбитам. На первый взгляд, что общего между этими частными закономерностями? Однако Ньютон показал, что все упомянутые явления суть следствия одного и того же закона — закона всемирного тяготения. Для того чтобы

это доказать, надо прибегнуть к логическим рассуждениям и к математическим вычислениям. Это и является примером применения теоретических методов в физике.

Развитие физики связано с одновременным использованием обоих ее методов — экспериментального и теоретического. Опытная физика разрабатывает и проводит физические опыты и систематизирует полученные результаты. Теория обобщает частные закономерности и сводит их к небольшому числу общих законов природы. После того как такой закон обнаружен, физика проверяет его применимость к новым, еще не исследованным явлениям. Если найдено противоречие — опыт и теория не сходятся,— теоретическая физика должна вновь взяться за работу и внести необходимые поправки в формулировки известных до того времени законов.

Для огромного класса физических явлений такие общие законы природы твердо установлены.

Это относится, например, к науке о движении тел и крупных частиц — механике, основывающейся на законах, открытых Ньютоном. Это относится к электромагнитным явлениям — законам получения и распространения электромагнитных волн, правилам действия электротехнических и радиотехнических схем. Эта огромная область знания опирается на общие законы природы, установленные Фарадеем и Максвеллом (к ним относится, например, закон электромагнитной индукции). В известной мере законченным является также учение о тепловых явлениях, подчиняющихся закону сохранения и превращения энергии и закону невозможности построения вечных двигателей.

Разумеется, это не означает, что в областях знания, о которых мы только что говорили, не могут быть сделаны важные открытия или найдены новые законы природы. Однако можно уверенно сказать, что такие новые законы, если они будут найдены, не нарушат стройности и ясности перечисленных нами разделов физики.

Наряду с более или менее законченными областями существуют разделы физики, в которых кипит исследовательская работа, где еще неясны общие законы природы. Это относится прежде всего к молекулярной, атомной, ядерной физике.

То, что открытие новых физических явлений и законов всегда имело влияние на жизнь человека, можно проиллюстрировать бесчисленным количеством примеров. Фарадей в 1832 г. еще не знал, можно ли найти практическое применение открытому им закону электромагнитной индукции. Прошло всего тридцать лет с момента этого открытия, и промышленность получила электрические динамо-машины. В основу их конструкции положен закон индукции. Электромагнитные волны были открыты Генрихом Герцем в 1888 г., а уже в 1895 г. наш замечательный соотечественник А. С. Попов демонстрирует первый в мире радиоприемник.

Чтобы приблизиться к сегодняшнему дню, скажем о влиянии атомной физики на современную технику. Исследование законов движения электронов в вакууме привело к созданию электронной лампы и телевизионной трубки. Изучение законов электропроводности привело к открытию замечательных свойств полупроводников. Техника использовала эти достижения и разработала способы изготовления кристаллических диодов и триодов, открывших огромные перспективы перед многими областями радиоэлектроники.

В течение двадцати лет физики занимались

изучением строения атомного ядра, единодушно полагая, что эти исследования имеют только теоретический интерес и не могут привести к практически важным результатам. Однако перед второй мировой войной было открыто деление ядра урана и началась эра овладения внутриядерной энергией.

Из этих немногих примеров ясно, что все события, имеющие революционное значение для техники, а следовательно, и для всего будущего человечества, явились естественным следствием открытий, сделанных физиками.

Однако задачи физической науки этим совершенно не исчерпаны. В настоящее время с наибольшим увлечением физики работают над двумя проблемами: исследованием элементарных частиц и применением физики к вопросам биологии.

Первая задача связана с ответом на основной вопрос науки: «Из чего построен мир?» Успехи технических средств атомной физики (таких, например, как громадные ускорители частиц, подобные советскому синхрофазотрону на 10 млрд. электроновольт) позволили добиться больших успехов в этой области. Можно предполагать, что в ближайшие годы мы получим отчетливое представление о свойствах и особенностях всех элементарных частиц. Однако до сих пор не создана теория, которая могла бы объяснить, как возникают и «живут» наблюдаемые частицы.

Применение физики в биологии по сути дела только начинается. Перед исследователями стоят сложнейшие задачи опытного исследования физических и химических процессов, протекающих в живом организме. Глубокое познание этих процессов даст ученым возможность еще более решительно вмешиваться в жизнь растений, животных и человека. Это не только принесет огромную хозяйственную пользу, но также позволит уверенно бороться со всеми заболеваниями и обеспечит человеку долгую жизнь.

Огромной остается роль физики в стремительном развитии техники. Одной из интереснейших физико-технических задач является создание материалов с наперед заданными свойствами. Особую важность имеют работы по созданию материалов, остающихся прочными при высоких температурах или сочетающих эластичность и прочность, а также материалов,

совмещающих в себе свойства электрического изолятора и магнита. Для решения этих задач необходимы глубокие физические исследования, выясняющие связи структуры материала с его свойствами.

Не менее интересны вопросы, стоящие перед исследователями, изучающими физические явления, происходящие при горении; знание законов горения необходимо для создания ракет дальнего действия. Огромное поле деятельности раскрывается перед физиками, изучающими строение ядра атома — ведь эпоха ядерной энергии только началась.

Овладение термоядерной энергией является задачей, важность которой нельзя переоценить. Желание поставить такой неограниченный источник энергии на службу человечеству привлекло к этой проблеме огромную армию исследователей. Они решают чисто физические задачи, без понимания которых эта цель не может быть достигнута.

Знакомство с важнейшими физическими законами, которые лежат в основе всех явлений природы, в основе действия всех современных машин, с законами, без которых нельзя понять жизнь растений и животных, обязательно сейчас для каждого человека, который хочет называть себя образованным и культурным.

Давно прошло то время, когда мерилом образованности служило одно лишь знакомство с литературой, живописью и музыкой. Человек, знакомый с живописью Рембрандта, пьесами Шекспира и музыкой Чайковского, но не понимающий, почему Земля не падает на Солнце, почему из атомных ядер можно черпать энергию и «кто» вычерчивает изображение на экране телевизора, не может называть себя образованным человеком.

Статьи, помещенные в разделе «Физика», конечно, далеко не исчерпывают всего содержания этой замечательной науки. Но читатель найдет здесь много новых для себя и интересных сведений из всех основных областей физики. Поэтому прочитать помещенные здесь статьи будет очень полезно не только тем, кто уже сейчас любит физику и технику, но и будущим историкам, литераторам и географам, всем будущим славным труженикам, новаторам и рационализаторам производства. В наше время знание основ физики необходимо всем!

Механические явления

ОСНОВЫ МЕХАНИКИ

Выйдем в осенний ясный вечер, посмотрим на темное, покрытое звездами небо. Множество звезд трудно запомнить, и кажется, что их невозможно пересчитать. Но вдруг среди звезд появилась огненная точка, стремительно мчащаяся по темному небу. Это метеор. Он невольно привлекает к себе внимание людей. Метеор невозможно незаметить, если смотреть на небо в момент его полета. Не будем говорить сейчас о том, что такое метеор. Об этом подробно сказано в т. 2ДЭ. Нам важно совсем другое: среди тысяч звезд этот метеор был нами мгновенно замечен. Почему это произошло? Ответ найти нетрудно. Метеор выделяется благодаря своему стремительному движению.

Если вдуматься глубже, то можно в конце концов убедиться в том, что мы узнаем окружающий нас мир и самих себя только благодаря тому, что есть движение. Мы рассматриваем предметы, следуя за ними взглядом, поворачивая голову, переходя с места на место. Мы воздействуем на окружающие нас вещи, передвигая или перенося их, изменяем их, перемещая их отдельные части.

Но и независимо от нашего воздействия все в окружающем нас мире и внутри нас так или иначе движется. Весь материальный, т. е. реально существующий, мир находится в состоянии вечно изменяющегося, но никогда не угасающего движения. Можно сказать: движение — это способ существования материи.

МЕХАНИЧЕСКОЕ ДВИЖЕНИЕ, ИЛИ ПЕРЕМЕЩЕНИЕ

Движение может быть различным. Вот, например, если лить воду на землю, то образуется лужа, поверхность которой по мере выливания воды увеличивается. Если надувать воздухом футбольный мяч, растет его объем. Но это сравнительно сложные виды движения.

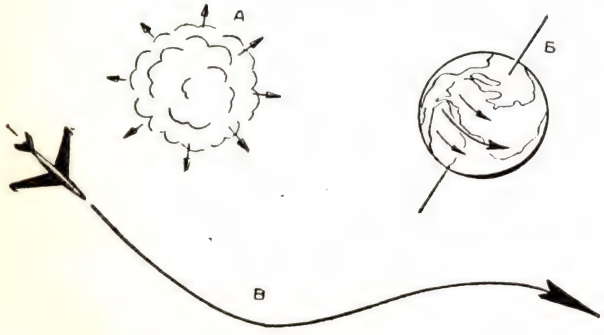
Наиболее простой формой движения является перемещение какого-либо предмета вдоль определенного пути. Особенно просто рассматривать такое перемещение, когда размеры тела малы по сравнению с тем путем, который оно проходит при своем движении.

Например, представьте себе, что мы едем в автомашине и, остановившись, спрашиваем у прохожего: «Сколько километров осталось до Москвы?» Было бы очень смешно, если бы он ответил: «Шоферу до Москвы осталось десять километров, а пассажирам, сидящим на заднем сиденье,— десять километров и один метр...» Один метр по сравнению с десятью километрами очень малая величина, и во многих случаях такой малой величиной можно пренебречь.

Если движущееся тело очень невелико по сравнению с путем его движения, то тело можно считать просто точкой, а путь его движения — прямой или кривой линией.

Получается движение точки вдоль линии.

Движение точки вдоль линии — это наиболее простая форма движения. Его легче всего измерить и изучить. Поэтому с него удобнее всего начинать изучение науки о перемещениях тел, называемой механикой. Однако, изучив простейшее движение точки вдоль линии, можно свести к нему более сложные виды движения, например движение волн по поверхности воды или движение раскаленных газов, выбрасываемых из двигателя космической ракеты.



Различные формы механического движения: А — расширение газового облака; Б — вращение шара вокруг его оси; В — движение тела вдоль линии.

Химики, изучая вещество, разлагают его на мельчайшие частицы — молекулы и атомы.

Механики, изучая перемещение, т. е. механическое движение в самых сложных его проявлениях, разлагают это движение также на простейшие его составные части — на движение множества отдельных точек.

Вот почему движение точки вдоль линии — такое важное и нужное понятие, которое необходимо тщательно изучать.

ДВИЖЕНИЕ МОЖЕТ ПЕРЕХОДИТЬ ИЗ ОДНИХ ВИДОВ В ДРУГИЕ

Движение различных точек как в окружающей нас природе, так и в технике обычно связано в единую систему. При более подробном изучении такого движения можно установить, что движение передается от одних тел другим.

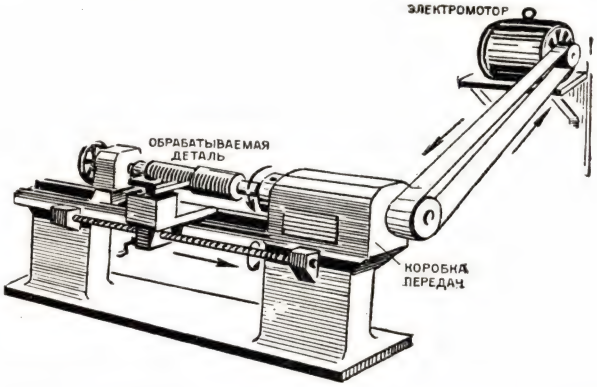


Схема движения деталей токарного станка. Движения различного вида переходят одно в другое.

Рассмотрим, например, работу хотя бы простейшего токарного станка, приводимого в движение электродвигателем при помощи ремня. Мы можем сразу заметить, что вращение якоря электродвигателя передается осью шкиву. Надетый на этот шкив приводной ремень движется более сложно.

Отдельные части ремня, огибая шкив электродвигателя, вместе со шкивом участвуют в его вращательном движении. Когда части ремня сбегают со шкива, они движутся прямолинейно.

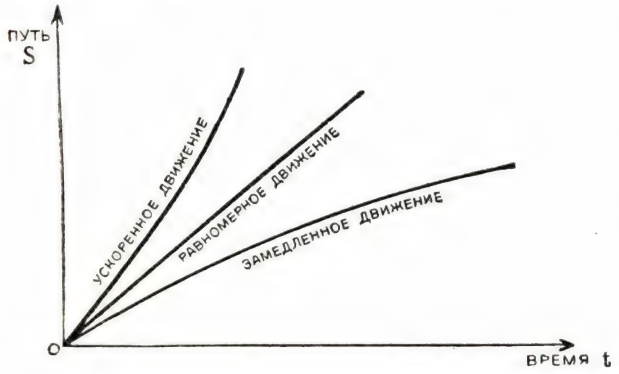
Набегая на шкив станка, части ремня вновь начинают участвовать во вращательном движении.

Вращение шкива через его ось передается системе шестерен, при этом скорость вращения изменяется, а вращение передается патрону с зажатой в нем обрабатываемой деталью.

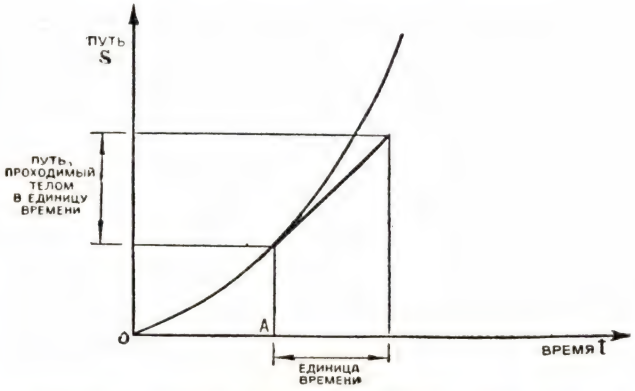
Кроме того, вращение передается винту, расположенному вдоль станины станка. На этот винт надета гайка, входящая в суппорт станка.

При вращении винта суппорт перемещается. Зажатый в суппорте резец движется вдоль обрабатываемой детали и снимает ровную стружку металла.

Если внимательно вглядеться в работу станка, а также и любой другой машины, то можно заметить, что, каким бы сложным ни было движение самой громоздкой машины, его в конце концов можно свести к простейшему движению отдельных точек по прямым и кривым линиям.



Зависимость пути S, проходимого телом при его движении, от времени t. Чем круче поднимается на графике линия, тем больше скорость движения.



Скорость в момент времени A численно равна пути, который прошло бы тело за единицу времени, двигаясь равномерно.

СКОРОСТЬ

Всякое движение, в частности перемещение вдоль какой-нибудь линии, может быть более или менее быстрым.

Если движение очень медленное, например рост травы, движение часовой стрелки, мы его непосредственно не можем видеть.

Когда движение происходит быстрее, оно хорошо заметно. Если тело проходит в каждую секунду от нескольких миллиметров до нескольких десятков метров, мы хорошо видим само движение, и, наконец, если скорость достигает сотен и тысяч метров в секунду, то на сравнительно близком расстоянии (десятки и сотни метров) оно становится неуловимым. С такой скоростью движутся, например, пули и снаряды.

Конечно, при более значительном расстоянии может показаться движущимся сравнительно медленно даже очень быстро летящее тело. Например, искусственный спутник или его ракета-носитель, проходящие на расстоянии нескольких сотен километров от наблюдателя, кажутся перемещающимися довольно медленно, несмотря на то что они проходят в течение каждой секунды почти 8 *км*.

Как бы то ни было, наиболее просто можно выразить быстроту движения, указывая путь, какой могло бы пройти тело, если бы оно двигалось с той же быстротой в течение какой-либо единицы времени, например часа или секунды.

При этом совершенно не нужно, чтобы движение происходило все время в течение избранной единицы времени.

Так, если автомашина идет со скоростью, равной сорока километрам в час, то это вовсе не значит, что она обязательно будет двигаться час и за это время пройдет сорок километров. Здесь все дело в том, что автомашина движется таким образом, что если бы она шла равномерно один час, то прошла бы путь в сорок километров.

Скорость является мерой быстроты нарастания пути с течением времени, поэтому судить о скорости можно по тому пути, какой был бы пройден, если бы тело, не меняя быстроты движения, двигалось в течение выбранной единицы времени.

Величину скорости можно получить делением длины пути, пройденного при равномерном движении, на время, в течение которого этот путь пройден. Равномерным движением называется такое движение, при котором за

любые одинаковые промежутки времени проходятся одинаковые части пути.

Поэтому скорость выражают обычно в единицах, получающихся при делении единиц длины на единицы времени. Например, скорость, равная 5 километрам в секунду, обозначается так:

$$5\ \frac{\text{километров}}{\text{в секунду}} \text{ или } 5\ \textit{км/сек}.$$

СКОРОСТЬ — ПРОИЗВОДНАЯ ПУТИ ПО ВРЕМЕНИ

Скорость определяет движение в каждый данный момент. Если, например, проследить за падением камня, то можно установить, что его скорость непрерывно растет. Следовательно, если мы каким-либо способом установим, что в определенном месте скорость падения равна некоторой величине, то эта скорость соответствует движению тела только в данной точке пути.

Это требует более подробного объяснения. Всякое движение происходит вдоль какого-либо пути. Чтобы говорить о движении, надо обязательно указать хотя бы небольшой участок пути, по которому движется тело. Однако если мы выделим более или менее длинный участок пути, то на этом участке скорость изменяется (в случае падения — возрастает), и нельзя говорить об определенной скорости. Как же выйти из этого противоречия?

Наука установила следующий способ решения такой задачи. Проходимый телом путь необходимо рассматривать на возможно более коротком отрезке. Точнее говоря, нужно сделать эту длину такой малой, чтобы изменение скорости стало практически незаметным. Время движения также будет при этом чрезвычайно малым.

Таким образом, можно считать, что при переменном движении путь и время движения должны быть взяты предельно малыми, меньшими любой величины, какую можно было бы указать. Такой бесконечно малый отрезок, на который увеличился пройденный телом путь в рассматриваемый нами момент времени, т. е. бесконечно малое приращение пути за бесконечно малое время, называется дифференциалом пути. Бесконечно малое время называется дифференциалом времени.

Если разделить бесконечно малое приращение пути на бесконечно малое приращение времени движения, то мы получим скорость движения, точно соответствующую действительной быстроте движения в заданной точке пути.

Если одна величина делится на другую, то полученный результат нередко называют отношением. Таким образом, скорость переменного движения есть отношение бесконечно малого приращения пути к бесконечно малому приращению времени движения.

Получаемая таким способом величина называется производной пути по времени.

Мы довольно подробно остановились здесь на том, как определить скорость переменного движения. Это необходимо было сделать потому, что скорость, изменяющуюся во времени, можно считать хорошим примером самых разнообразных величин, изменяющихся в зависимости от тех или иных условий. Такие величины очень часто встречаются в науке и технике, и их изучение является основой для выявления разных законов природы и для использования этих законов на практике.

Подробному изучению величин, называемых дифференциалами, посвящен большой раздел математики — дифференциальное исчисление. Более подробно о нем можно узнать в статье «Интеграл и производная», помещенной в разделе математики этого же тома ДЭ.

ПРИМЕРЫ ДВИЖЕНИЙ, ИМЕЮЩИХ РАЗЛИЧНЫЕ СКОРОСТИ

Скорость — это понятие, которое очень широко применяется в жизни, технике, науке. Этим же понятием часто пользуются люди, не вникающие подробно в его сущность. Практика, однако, показывает, что только при более подробном изучении можно воспользоваться скоростью как серьезным научным понятием.

Приведем некоторые характерные скорости движения, встречающиеся в природе и технике.

Скорость человека, идущего шагом, равна примерно 1 *м/сек*, или 3,6 *км/час*. Бегущий человек имеет скорость, примерно 5 *м/сек*, или 18 *км/час*.

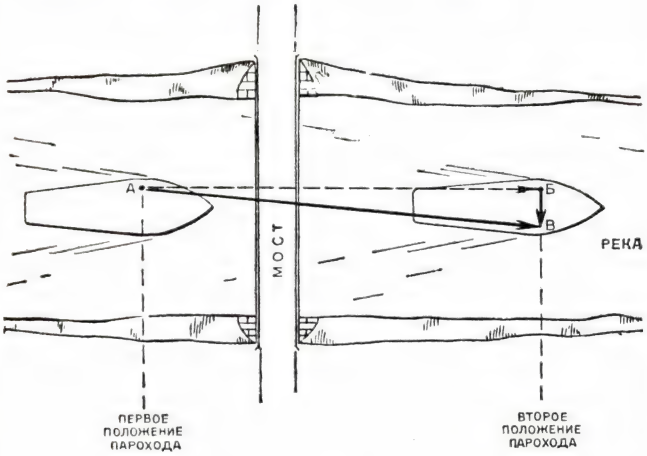
Сильный ветер — воздух, перемещается со скоростью от 10 до 20 *м/сек*, или от 36 до 72 *км/час*.

Искусственный спутник Земли проходит в секунду 7900 *м* (7,9 *км*), или 28 440 *км/час*.

Космическая ракета, запущенная на Марс, должна улететь с Земли со скоростью 11,59 *км/сек*.

Космическая ракета, летящая к Юпитеру, должна иметь скорость 14,24 *км/сек*.

Такая же ракета, направленная к Сатурну, должна иметь скорость 15,21 *км/сек*.



Движение человека на пароходе (в плане): АБ — скорость парохода относительно наблюдателя; БВ — скорость человека относительно парохода; АВ — скорость человека относительно неподвижного наблюдателя.

Космическая ракета-звездолет, которая должна совсем уйти из солнечной системы в межзвездное пространство, должна иметь при отлете с Земли скорость более 17 *км/сек*.

Приведенные скорости космических ракет даны для такого случая, когда пуск происходит с одного из полюсов Земли и ракета направляется в ту же сторону, куда движется Земля по своей орбите.

Скорость движения Земли вокруг Солнца равна примерно 30 *км/сек*. Наибольшая скорость, известная в природе,— это скорость распространения света и радиоволн. Она равна 300 000 *км/сек*.

СКОРОСТЬ — ВЕКТОР

Скорость имеет не только величину; она всегда связана с движением, имеющим определенное направление. Поэтому, для того чтобы полностью указать характер движения, необходимо не только знать величину скорости, но также и установить направление движения.

Чтобы наглядно изобразить скорость при таких условиях, принято рисовать стрелку, длина которой пропорциональна величине скорости, а направление указывает направление движения.

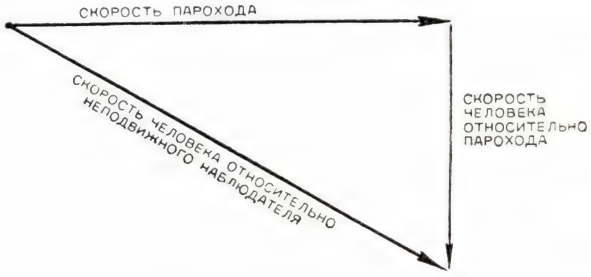
Величина, которую можно изобразить в виде такой стрелки, называется вектором. Таким образом, с точки зрения математики, скорость — это вектор. (Более подробно о векторах и операциях над ними говорится в статье «Геометрическая алгебра», помещенной в разделе математики этого же тома ДЭ.)

СЛОЖЕНИЕ СКОРОСТЕЙ

Очень часто бывает так, что тело имеет сразу несколько движений. Например, по реке движется пароход, а по его палубе идет человек в направлении, перпендикулярном к линии движения парохода. Если на этого человека посмотреть с моста, под которым проходит пароход, то будет видно, что человек движется по направлению, составляющему определенный угол с линией движения парохода.

Какова будет скорость человека на пароходе относительно того наблюдателя, который смотрит с моста?

Чтобы получить ответ на такой вопрос, надо нарисовать вектор скорости парохода и от его конца в соответствующем направлении



Сложение скоростей.

отложить вектор скорости человека относительно парохода. Потом надо от начала вектора скорости парохода провести прямую линию к концу вектора скорости человека. Эта линия и будет вектором скорости человека на пароходе относительно наблюдателя на мосту и вообще относительно земного шара. Если пароход движется со скоростью 4 *км/час*, а человек идет со скоростью 3 *км/час* по направлению, перпендикулярному к линии движения

парохода, то описанное выше построение приведет к появлению прямоугольного треугольника. У этого треугольника катетами являются скорость человека относительно парохода и скорость парохода, а гипотенуза — скорость человека относительно наблюдателя, стоящего на мосту, и всей Земли.

Как известно, по теореме Пифагора, квадрат гипотенузы равен сумме квадратов катетов. На этом основании определяем скорость человека на пароходе относительно Земли:

$$\sqrt{4^2+3^2}=\sqrt{16+9}=\sqrt{25}=5 \text{ км/час.}$$

Из рассмотренного примера вытекает очень существенный вывод о том, что всякая скорость может рассматриваться только по отношению к какому-то телу, которое мы считаем неподвижным.

Например, если человек идет по поверхности Земли, то мы обычно измеряем его скорость относительно Земли. Если же скорость этого человека нужно установить относительно Солнца, то следует сложить вектор скорости человека относительно Земли с вектором скорости Земли относительно Солнца. Кроме того, нужно было бы учесть еще скорость, получающуюся вследствие вращения Земли. При таком сложении движение человека и даже вращение Земли имели бы ничтожное значение, а основное значение имела бы скорость движения Земли по ее орбите вокруг Солнца.

УСКОРЕНИЕ

В непрерывно изменяющемся движении в природе и технике трудно найти такие виды движения, которые протекали бы со строго постоянной скоростью. Скорость обычно то увеличивается, то уменьшается. Она может также изменять свое направление. Все эти изменения тоже нужно измерять и выражать в определенной мере.

С этой целью введена величина, называемая ускорением. Ускорение — это мера быстроты изменения скорости, т. е. изменение скорости за единицу времени (при условии, что за эту единицу времени скорость изменяется равномерно).

Ускорение вычисляется так: изменение скорости, измеряемое, например, метрами в секунду (или $\frac{\text{метры}}{\text{секунды}}$ = *м/сек*), делится на соответствующее время, измеряемое, например, в секундах.

Поэтому ускорение измеряется метрами, дважды деленными на секунды, т. е. на секунды в квадрате, или величиной

$$\frac{\text{метры}}{\text{секунды}^2} = \text{м/сек}^2.$$

Вместо метров и секунд могут быть, конечно, применены любые другие единицы длины и времени.

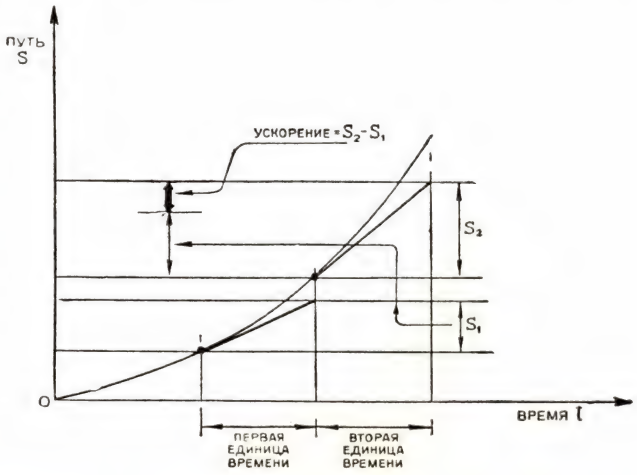
Изменение скорости, учитываемое при расчете ускорения, может возникнуть не только при увеличении или уменьшении быстроты движения, но и при изменении направления движения.

Например, если направление изменилось на 60°, то это соответствует изменению скорости на величину, равную самой скорости.

Подобно скорости, ускорение может быть переменным в зависимости от пути, проходимого движущимся телом, и от времени движения.

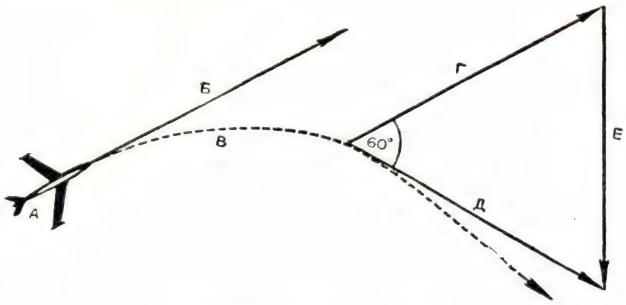
Учитывая это обстоятельство, можно об ускорении сказать то же самое, что было сказано относительно скорости переменного движения в разделе этой статьи «Скорость — производная пути по времени».

Можно считать, что ускорение есть отношение бесконечно малого изменения скорости к бесконечно малому приращению времени. Другими словами, ускорение — это производная скорости по времени.



Скорость по истечении первой единицы времени численно равна пройденному за это время пути (S_1). Скорость по истечении второй единицы времени также численно равна пути, пройденному за эту единицу времени (S_2). $S_2 - S_1 = a$ — ускорение. Это число, равное приращению скорости за единицу времени.

Здесь мы вновь встречаемся с бесконечно малыми величинами — дифференциалами, т. е. с некоторыми из тех «кирпичиков», из которых строится раздел высшей математики, называемый дифференциальным исчислением.



Если угол поворота самолета равен 60°, то изменение скорости, обусловленное поворотом, равно по величине самой скорости (если численное значение скорости не изменилось): А — первоначальное положение самолета; Б — вектор первоначальной скорости; В — путь самолета; Г — вектор первоначальной скорости, перенесенный параллельно самому себе; Д — вектор скорости после поворота самолета; Е — вектор, изображающий изменение скорости.

ЗАКОН ИНЕРЦИИ

Ускорение — это потому такая важная для науки величина, что оно выражает степень воздействия на движущееся тело других тел. Такое воздействие может происходить непосредственно путем соприкосновения или иными способами.

На основе многочисленных опытов установлено, что тело, не подвергающееся никаким воздействиям, будет двигаться прямолинейно с постоянной скоростью или будет оставаться неподвижным. Этот закон был установлен в XVIII в. великим английским ученым Исааком Ньютоном и называется законом инерции.

СИЛА — МЕРА ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ

Если скорость тела изменяется, т. е. если это тело имеет определенное ускорение, значит, какое-то действие изменяет движение тела.

Вот, например, перед нами стоит на пусковой площадке мощная космическая ракета. Все готово к пуску. Дан сигнал старта. В реактивном двигателе зажжено топливо. Раскаленные газы вырываются из сопла двигателя в нижней части ракеты. Мы видим ослепительно яркий свет, который становится все сильнее... И вот вдруг ракета медленно, как бы нехотя поползла вверх. Из ее двигателя вырывается огненный хвост. Гул наполняет все небо; скорость ракеты непрерывно нарастает.

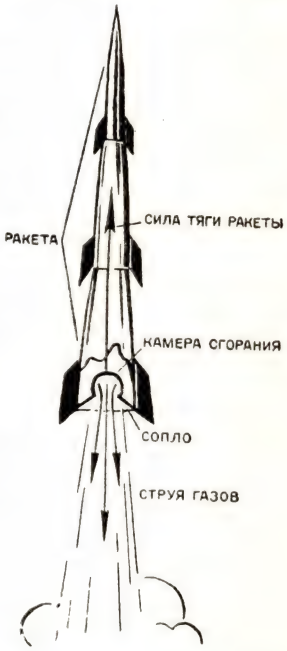
Совершенно ясно, что есть определенная причина, вызывающая движение ракеты. Эта причина использована человеком, построившим и запустившим ракету. Однако, чтобы точно и безотказно управлять движением ракеты, да и вообще всяким движением, необходимо не только знать причину этого движения, но и уметь точно выразить эту причину в определенной мере.

Причиной нарастания скорости ракеты является сила тяги ее реактивного двигателя. Вообще сила — это мера воздействия, которое может вызывать изменение величины скорости движущегося тела или изменение направления его движения.

Следовательно, для того чтобы управлять движением, надо воздействовать на движущееся тело определенными силами.

Ракета поднимается вверх потому, что в камере сгорания ее двигателя при горении возникает высокое давление. Это давление преодолевает вес ракеты и толкает ее вверх, сообщая ей определенное ускорение. Таким образом, сила возникает при взаимодействии раскаленных продуктов горения и тела ракеты. Значит, сила — это мера взаимодействия тел. В примере с ракетой сила производит два действия: во-первых, преодолевает вес ракеты; во-вторых, постепенно увеличивает ее скорость.

Кроме того, сила может производить и другие действия. Например, при действии силы происходит сжатие пружины, изгиб упругой балки и другие изменения формы и размеров тел.



Ракета движется вверх под действием силы давления газов в камере сгорания реактивного двигателя. Вниз из сопла двигателя выбрасывается струя газов.

УСКОРЕНИЕ — МЕРА СИЛЫ И МАССЫ ТЕЛА

Сила — очень удобное понятие потому, что она непосредственно связана с ощущением, которое испытывает человек, когда воздействует на различные тела.

Чтобы представить себе силу, движущую ракету, можно немного пофантазировать. Представь себе, читатель, что ты великан и своей мощной рукой поднял и бросил ракету в беспредельный Космос. То усилие, которое ты ощутил бы при этом, и позволяет наглядно представить, что такое сила.

Однако такое наглядное представление, очень полезное для первого практического знакомства с силой, недостаточно для того, чтобы измерить силу. Поэтому надо найти какой-то способ выразить силу определенным числом.

Чтобы решить эту задачу, обратимся к опыту, который показывает, что чем больше сила, действующая на данное тело, тем больше и ускорение. Поэтому будем считать, что сила пропорциональна тому ускорению, которое она вызывает. Можно считать также, что сила имеет определенное направление — она направлена в ту же сторону, куда перемещается тело под действием этой силы.

Отсюда следует, что сила, так же как скорость и ускорение, является вектором.

Однако сила зависит не только от ускорения. Различные тела состоят из различного количества вещества. Это количество можно назвать массой тела. Очевидно, что для получения определенного ускорения нужна тем более значительная сила, чем больше масса тела.

Отсюда следует, что сила пропорциональна не только ускорению, но и массе того тела, которое получает ускорение.

При этом, конечно, не учитывается вес тела и сопротивление его движению, вызываемое трением. Чтобы преодолеть вес и трение, нужна дополнительная сила, которую следует учитывать и измерять отдельно.

Сила = Масса × Ускорение.

Этот закон, так же как и закон инерции, был установлен Ньютоном.

Силу тяги ракеты можно себе представить, если предположить, что ее движение обусловлено воздействием человека.

ЕДИНИЦЫ СИЛЫ И ЕДИНИЦЫ МАССЫ

Чтобы производить различные расчеты, нужно установить определенные единицы силы и единицы массы.

За единицу массы принято считать массу одного литра дистиллированной воды, взятой при температуре 4° Цельсия.

За единицу силы принимают силу, с которой килограмм массы притягивается к Земле. Эта единица называется килограммом силы.

Для удобства расчетов часто применяют техническую единицу массы (*тем*). Это такая масса, которой один килограмм силы сообщает ускорение, равное 1 *м/сек*^{2}.

Путем наблюдений установлено, что тела падают под действием силы тяжести с ускорением, равным 9,81 *м/сек*^{2}. Отсюда следует, что техническая единица массы равна 9,81 килограмма массы.

ВСЕМИРНОЕ ТЯГОТЕНИЕ

Мы уже говорили о силе тяжести. Эта сила вызвана притяжением всех тел к Земле. Если, например, стоя на балконе, выпустить из руки камень, то он будет падать вниз под действием силы тяжести. Другими словами, камень будет падать потому, что его притягивает Земля.

В первой половине XVII в. знаменитый итальянский ученый Галилео Галилей впервые измерил ускорение падающего тела и установил, что все тела падают с одинаковым ускорением (если исключить сопротивление воздуха). Это ускорение равно приблизительно

$$g = 9{,}81 \text{ м/сек}^2.$$

Другими словами, всякое тело, падающее свободно, должно было бы приобрести к концу первой секунды скорость, равную 9,81 *м/сек*.

Очень важно то, что все тела падают с одинаковым ускорением. Это значит, что сила их притяжения к Земле пропорциональна массе этих тел.

Ньютон установил, что все тела притягиваются к Земле, а также друг к другу с силой, пропорциональной их массам.

Сила тяжести приложена к центру массы (или, что то же самое, к центру тяжести тела). Ньютон установил, что сила взаимного притяжения тел обратно пропорциональна квадрату расстояния между центрами их масс. Этот закон носит название з а к о н а в с е м и р-

ного тяготения. Его можно записать так:

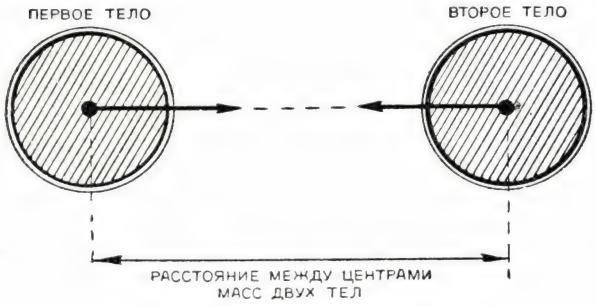
сила притяжения двух масс = сила притяжения двух масс, каждая из которых равна единице, при расстоянии между их центрами тяжести, равном единице ×

$$\times \frac{(\textit{масса первого тела}) \times (\textit{масса второго тела})}{(\textit{расстояние между центрами тяжести})^2}.$$

Сила притяжения двух масс, из которых каждая равна технической единице массы, при расстоянии между их центрами в 1 *м* очень невелика. Мы ее практически не замечаем. Однако точными приборами эту силу все же можно измерить.

Например, если на тонкой упругой нити подвесить легкую палочку с массивными шарами на концах и приблизить к одному из шаров сбоку другой массивный шар, то при помощи микроскопа можно заметить, что палочка чуть-чуть повернется и шары немного сблизятся друг с другом. Это произойдет вследствие взаимного притяжения шаров друг к другу.

Крутильный маятник для измерения взаимного притяжения тел. Слева — простейший измерительный микроскоп; справа — стрелками показано направление поворота крутильного маятника под действием притяжения шаров А и Б.



Взаимное притяжение двух тел.

Прибор, подобный описанному, называется крутильными весами. С его помощью можно доказать, что любые массы притягиваются друг к другу, и измерить силу их притяжения.

Таким способом установлено, что два тела с массами, равными (каждая) одной технической единице массы (9,81 *кг* массы), и при расстоянии между их центрами тяжести, равном одному метру, притягиваются друг к другу с силой

$$\frac{6{,}65}{100\,000\,000\,000\,000}\ кГ.$$

Эта сила составляет примерно

$$\frac{1}{1\,500\,000\,000}$$

часть веса притягивающихся тел. Столь малая величина обычно не имеет практического значения. Однако ее значение в науке весьма велико. Например, зная эту величину, можно очень просто на основе закона всемирного тяготения определить массу Земли. Исходя из массы Земли, можно установить массу Солнца, Луны и других планет.

Так крутильные весы позволяют «взвешивать» небесные тела.

ПРИМЕР РАСЧЕТА СИЛЫ

После того как мы рассмотрели, что такое сила и как она измеряется, вернемся к космической ракете, запуск которой был описан выше.

Наблюдая за ракетой при помощи особых приборов, можно определять в разные моменты времени место ее положения и скорость движения.

Допустим, что в течение 100 секунд ракета поднялась вертикально вверх на высоту 150 *км*. При этом ускорение оставалось постоянным. Это значит, что скорость нарастала равномерно от нуля до наибольшего значения в конце пути.

График изменения скорости и времени при прохождении ракетой заданного пути.

Таким образом, средняя скорость движения должна лежать в середине между нулем и максимальной скоростью.

Максимальную скорость можно найти так. Раньше мы уже установили, что скорость равномерного движения можно получить, если разделить путь, пройденный движущимся телом, на время движения. Если бы ракета двигалась

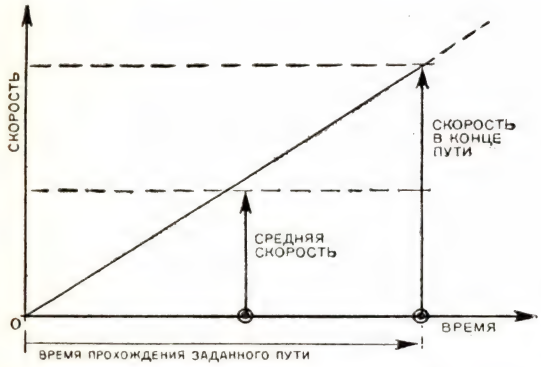


График изменения скорости в зависимости от времени при равномерном нарастании скорости. Средняя скорость на заданном пути равна половине скорости в конце пути.

равномерно, то ее скорость была бы равна

$$\frac{150\ км}{100\ сек.} = 1{,}5\ км/сек.$$

Нетрудно сообразить, что средняя скорость и скорость равномерного движения должны быть одинаковыми. Отсюда следует, что средняя скорость ракеты равна 1,5 *км/сек*.

Мы установили, что скорость ракеты в конце пути, который она прошла за 100 секунд, вдвое больше средней скорости. Значит, скорость ракеты через 100 секунд равна

$$1{,}5\ км/сек \times 2 = 3\ км/сек, \text{ или } 3000\ м/сек$$

Теперь определим ускорение ракеты. Оно равно конечной скорости 3 *км/сек*, деленной на время движения. Отсюда ускорение ракеты равно $\frac{3000\ м/сек.}{100\ сек.} = 30\ м/сек^2$.

В качестве примера будем считать, что в момент пуска масса ракеты составляла 100 000 *кг* (т. е. 100 *т*). Чтобы выразить массу ракеты в технических единицах массы, разделим 100000 *кг* массы на 9,81 $м/сек^2$. Получаем округленно 10 200 *тем*.

Сила тяги двигателя, ускоряющая ракету, получится, если умножить ускорение ракеты на ее массу. Получаем:

$$10\ 200\ тем \times 30\ м/сек^2 = 306\ 000\ кГ \quad \text{силы.}$$

К этой силе необходимо добавить еще силу, нужную для преодоления веса ракеты и равную 100 000 *кГ*.

Поэтому общая сила тяги реактивного двигателя при пуске должна быть равна
306 000 *кГ* + 100 000 *кГ* = 406 000 *кГ* или 406 *Т*.

ДЕЙСТВИЕ СИЛ НА МНОГОСТУПЕНЧАТУЮ РАКЕТУ

Примеры расчетов, касающихся ракеты, рассмотренные в предыдущем разделе, не исчерпывают всех вопросов, которые невольно возникают, когда мы подробнее знакомимся с полетом ракеты.

Рассмотрим некоторые из таких вопросов. Прежде всего остановимся на расчете силы, движущей ракету. Как уже было сказано, эта сила вызвана тем, что из сопла реактивного двигателя выбрасывается мощная струя газов.

Масса газов, выбрасываемых в единицу времени — секунду, равна массе топлива, сжигаемого в течение этой же секунды в камере сгорания двигателя. Эта масса называется обычно расходом топлива. Газы выбрасываются с определенной скоростью, называемой обычно скоростью истечения.

Итак, масса, равная расходу топлива, получает в течение секунды скорость истечения. При таких условиях эта скорость истечения оказывается численно равной ускорению, потому что она получена за единицу времени — секунду.

Следовательно, принимая во внимание, что расход топлива — это изменение массы топлива за одну секунду, а скорость истечения численно равна ускорению, можно написать:

Сила тяги = Расход топлива × Скорость истечения.

В рассмотренном нами примере ускорение, сообщаемое ракете, было принято постоянным на всем пути ее разгона двигателем. Как указано было в предыдущем разделе, ускорение ракеты равно силе тяги, деленной на массу ракеты.

В массу ракеты входит и масса топлива. Так как топливо расходуется, то масса ракеты с течением времени уменьшается. Чтобы ускорение ракеты оставалось постоянным, необходимо уменьшать силу тяги, а значит, и расход топлива.

Расход топлива при таких условиях должен всегда находиться в определенном отношении к массе ракеты (вместе с имеющимся в данный момент топливом).

Обычно скорость истечения равна 2,5 *км/сек*, или 2500 *м/сек*.

Определим при таких условиях расход топлива в начале движения ракеты, о которой шла речь в предыдущем разделе.

На основании выведенного нами соотношения между силой тяги, расходом топлива и скоростью истечения можно определить расход топлива. Мы получим:

$$\textit{Расход топлива} = \frac{\textit{Сила тяги}}{\textit{Скорость истечения}}.$$

При таком расчете расход топлива получается в технических единицах массы в секунду.

В предыдущем разделе была определена сила тяги, которая оказалась равной 406 000 *кГ*. Поэтому

$$\textit{Расход топлива} = \frac{406\,000\ \textit{кГ}}{2500\ \textit{м/сек}} = 162\ \textit{тем/сек}.$$

Заменяя технические единицы массы килограммами массы (1 *тем*=9,81 *кг* массы), получаем:

Расход топлива= 1600 *кг/сек*.

Таким образом, мы получаем огромный расход топлива — более 1,5 *т/сек*.

Мы видим, что расход топлива при постоянном ускорении ракеты должен с течением времени уменьшаться, поэтому можно считать, что через некоторое время после начала полета очень мощный двигатель будет уже не нужен. Кроме того, и баки, из которых топливо уже израсходовано, тоже оказываются ненужными. Поэтому целесообразно их отбросить и таким образом облегчить ракету.

Чтобы добиться этого, ракету делают составной, из нескольких ступеней. Каждая ступень имеет свои баки с топливом и свой двигатель. По мере нарастания скорости эти ступени последовательно отбрасываются.

Согласно расчетам знаменитого русского ученого К. Э. Циолковского, наиболее выгодное использование возможностей многоступенчатых ракет получится тогда, когда массы отдельных ступеней находятся в определенном отношении друг к другу.

Для примера рассмотрим ракету, у которой головная часть весит одну тонну. Ракета-носитель должна сообщить этой головной части скорость, равную, например, 9 *км/сек*.

При таких условиях можно на основе теории Циолковского установить, что ракету целесообразно разделить на три ступени.

Первая ступень сообщает ракете скорость, равную 3 *км/сек*. Вторая увеличивает скорость до 6 *км/сек*. И, наконец, третья доводит скорость до 9 *км/сек*.

Исходя из известных по советской и иностранной печати образцов ракет, можно считать, что масса каждой ступени должна быть примерно в шесть раз меньше массы предыдущей ступени.

Если идти, наоборот, от головной части ракеты, получим следующее. Головная часть у нас принята с массой, равной 1 *т*. Примыкающая к ней последняя ступень ракеты должна иметь массу 6 *т*, следующая ступень — 36 *т* и, наконец, еще одна ступень должна иметь массу 216 *т*. При таких условиях общая масса ракеты будет составлять

$$\begin{array}{r} 1 \\ 6 \\ +\ 36 \\ 216 \\ \hline 259\ т. \end{array}$$

В соответствии с этим должны быть обеспечены величины силы тяги. Эти величины будут больше, чем в рассмотренном выше примере, потому что масса ракеты здесь получилась больше.

СЛОЖЕНИЕ СИЛ

Мы видели уже, что силы — это векторы. Их можно изображать в виде стрелок. Длина этих стрелок должна соответствовать величине сил, а направление — указывать, куда действует сила.

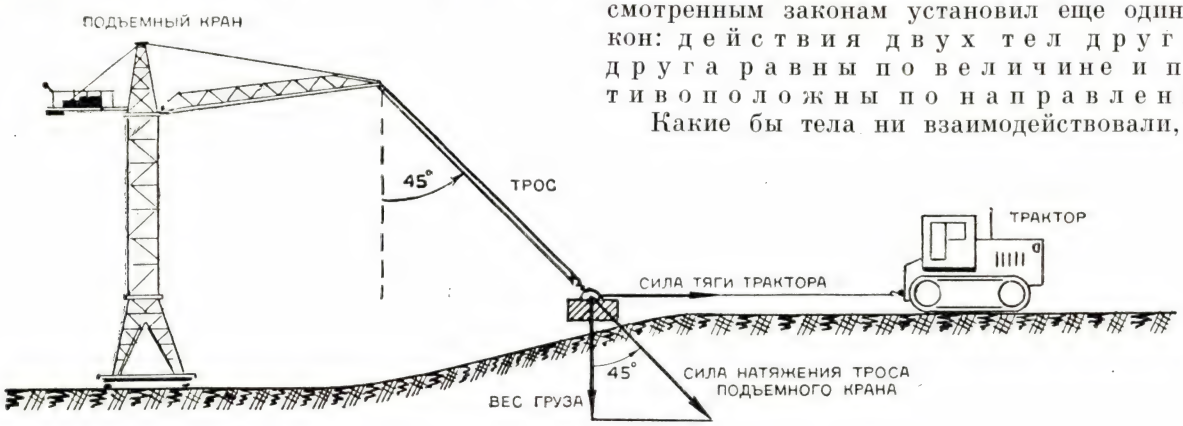
Можно, например, выбрать такой размер стрелок, чтобы каждому килограмму силы соответствовал один миллиметр длины стрелки.

Векторы можно складывать. Это мы видели уже на примере сложения скоростей. Совершенно таким же способом можно складывать и силы.

Представим себе, что кран поднимает груз; рассмотрим, как нужно поступить, если этот груз нужно будет опустить в место, до которого стрела крана не достигает. Ответ прост — нужно оттянуть груз вбок какой-либо посторонней силой. Например, к грузу можно прикрепить трос и потянуть его трактором. На какой угол отклонится трос, если сила тяги трактора известна?

Чтобы решить такую задачу, нужно на рисунке изобразить центр тяжести груза и построить из этого центра вниз стрелку, длина которой соответствует весу груза. Эту стрелку надо направить вертикально вниз потому, что

сила тяжести действует по этому направлению. Кроме этого, к центру тяжести приложена еще горизонтальная сила той же величины. Чтобы сложить обе силы, надо к началу стрелки, изображающей вес тела, пристроить стрелку той же величины, направленную горизонтально. Потом следует центр тяжести соединить с концом горизонтальной стрелки прямой линией. Эта линия по направлению и величине изображает силу, которая производит действие, равное действию обеих сил. Поэтому такая сила называется равнодействующей.



Действие силы тяги на груз, подвешенный к подъемному крану.

Полученная на нашем чертеже равнодействующая наклонена под углом 45° к вертикали. Она должна натянуть тросы крана тоже под таким углом.

Величина силы, натягивающей тросы крана, при этом равна гипотенузе прямоугольного треугольника, катетами которого являются вес и горизонтальная сила (равные друг другу).

Гипотенуза в таких условиях больше каждого из катетов в $\sqrt{2}$ раз.

Если, например, вес груза 100 *кГ*, то сила, натягивающая трос, будет равна

$$100 \cdot \sqrt{2} \approx 100 \cdot 1{,}414 \approx 141{,}4 \text{ кГ}.$$

ДЕЙСТВИЕ РАВНО ПРОТИВОДЕЙСТВИЮ

Из рассмотренного примера видно, что несколько сил, действующих на какое-нибудь тело, можно заменить одной.

Если на какое-либо тело действуют две силы, равные по величине и направленные в противоположные стороны, то при сложении эти силы должны взаимно уравновешиваться.

Однако если на тело действует только одна сила, например сообщающая ему ускорение, то эта сила полностью затрачивается на это ускорение и сообщить ускорение какому-либо другому телу уже не может. Это значит, что тело, которому сила сообщает ускорение, оказывает силе сопротивление, равное этой силе по величине, но направленное в противоположную сторону. Это гасит действующую силу.

Исаак Ньютон в дополнение к уже рассмотренным законам установил еще один закон: действия двух тел друг на друга равны по величине и противоположны по направлению.

Какие бы тела ни взаимодействовали, какие бы ни происходили изменения их движения, сила является всегда мерой их взаимодействия; она проявляется дважды: один раз на одном, а другой раз на другом теле.

Вот, например, космическая ракета, которую мы рассматривали, движется вверх, потому что ее толкают вперед раскаленные газы в камере двигателя. Однако вместе с тем эти газы выбрасываются через сопло двигателя назад в виде длинной огненной струи. Следовательно, на них действует сила, противоположная силе, толкающей ракету, так как они движутся в сторону, противоположную ее движению. Обе эти силы — проявление одного и того же взаимодействия газов с ракетой.

ИМПУЛЬС СИЛЫ И КОЛИЧЕСТВО ДВИЖЕНИЯ

Всякая сила действует то или иное время. Например, тепловоз или электровоз должен некоторое время тянуть состав вагонов, прежде чем поезд достигнет заданной скорости.

Следовательно, действие силы, называемое импульсом силы (или просто импульсом), тем больше, чем больше сила и чем больше время ее действия.

Импульс силы выражают в виде произведения силы на время ее действия.

Результат постепенного действия силы — сообщение какому-нибудь телу определенной скорости. Чем больше масса тела и его скорость, тем значительнее само явление движения. Обычно количество движения выражают как произведение массы на скорость ее движения.

На основе очень простых расчетов можно вывести, что *импульс силы* равен *количеству движения*, или

$$Сила \times Время = Масса \times Скорость.$$

Справедливость последнего равенства очень легко доказать на основе закона Ньютона о связи силы и ускорения. Именно: мы видели, что

$$Сила = Масса \times Ускорение.$$

Отсюда следует, что предшествующее равенство можно переписать так:

$$Масса \times Ускорение \times Время = Масса \times Скорость.$$

Если учесть, что в левой части последнего равенства

$$Ускорение \times Время = Скорость,$$

то получим, что левая часть равна правой. Таким образом, правая и левая части равенства тождественно равны друг другу.

Равенство импульса силы количеству движения позволяет очень удобно решать многие задачи.

Вот, например, электровоз начинает свое движение и тянет поезд. При этом он за две минуты сообщает поезду скорость, равную 36 *км/час*. Необходимо при таких условиях определить среднюю силу тяги электровоза.

Масса поезда 4000 *т*. Сила трения колес о рельсы равна в этом случае примерно 30 *Т*. Электровоз должен дать более значительную силу тяги, чтобы разогнать поезд до заданной скорости.

Переведем скорость поезда в метры в секунду, учитывая, что час содержит 3600 *сек*. Получим.:

$$36\ км/час = \frac{36\,000\ м}{3600\ сек} = 10\ м/сек.$$

Определяем массу поезда в технических единицах:

$$4000\ т = 4\,000\,000\ кг\ массы = \frac{4\,000\,000\ кг}{9{,}81\ кг/тем} = 410\,000\ тем.$$

Количество движения равно

$$410\,000\ тем \cdot 10\ м/сек = 4\,100\,000\ тем \cdot м/сек.$$

Соответствующий импульс силы тяги электровоза, ускоряющий поезд, равен

$$Сила \times Время = Сила \times 120\ сек.$$

Согласно равенству импульса силы количеству движения можно написать:

$$Сила \times 120\ сек. = 4\,100\,000\ тем.м/сек,$$

откуда

$$Сила = \frac{4\,100\,000\ тем \cdot м/сек}{120\ сек.} = 34\,200\ кГ, \text{ или } 34{,}2\ Т.$$

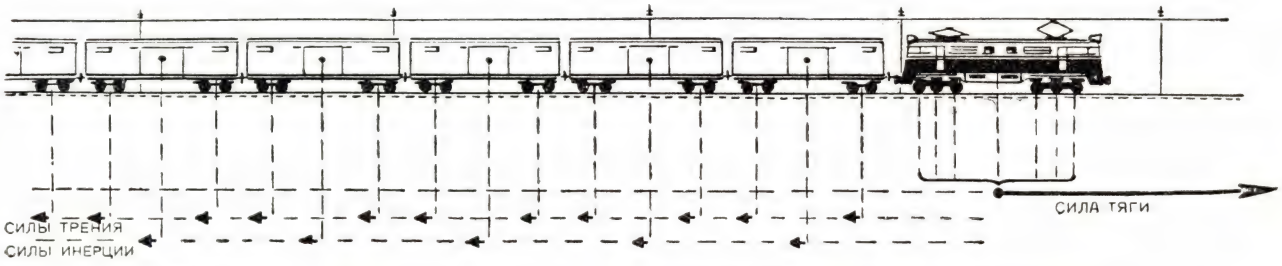
Вспомним, что, кроме этого, затрачивалась сила в 30 *Т* на преодоление трения колес при движении по рельсам. Поэтому общая сила тяги электровоза составляет

$$30Т + 34{,}2\ Т = 64{,}2\ Т = 64\,200\ кГ.$$

РАБОТА И ЭНЕРГИЯ

Импульс силы не всегда может определить те изменения и перемещения, которые производит сила.

Вот, например, на рельсах стоит вагон с грузом, который весит 64 *Т*. Вес этого вагона равен как раз силе тяги электровоза, которую мы рассчитали в предыдущем примере. Однако этот вес не производит никаких существенных перемещений. Внимательный наблюдатель мог



При ускоренном движении поезда сила тяги электровоза равна сумме всех сил трения и сил инерции.

бы только заметить, что под давлением колес вагона очень немного осели рельсы и шпалы немного вдавились в слой балласта.

Конечно, эти перемещения ни в какое сравнение не могут идти с тем движением, которое сообщала такая же сила поезду, когда эта сила действовала в виде тяги электровоза. Вагон может стоять на месте не только две минуты, за которые электровоз разгонял поезд, но даже два десятка лет, и результат действия силы будет тем же.

Из этого примера видно, что импульс силы не всегда определяет те перемещения, какие может произвести сила.

Чтобы определить результат действия силы, необходимо учесть то перемещение, которое эта сила произвела.

Вот такой результат называется р а б о т о й с и л ы. Работа, очевидно, тем больше, чем больше сила и чем больше перемещение, вызванное этой силой. Поэтому работа принимается равной произведению силы на путь:

$$Работа = Сила \times Путь.$$

В соответствии с этим единицы для измерения работы получаются путем перемножения единиц силы на единицы пути. Широко распространенной единицей измерения работы является к и л о г р а м м о м е т р. Могут быть также применены тонна-метры или тонна-километры. Так как тонна в 1000 раз больше килограмма, а километр в 1000 раз больше метра, то тонна-километр в миллион раз больше килограммометра.

Здесь нужно заметить, что тонна-километр как единицу работы не следует смешивать с тонна-километрами, в которых выражают работу транспорта, умножая вес перевезенных грузов на расстояние их перевозки. Почему в этом случае мы не получаем работы? Потому что работа — это произведение силы на путь, пройденный в направлении действия силы.

При рассмотренном же нами учете работы транспорта вес грузов действует вертикально, а грузы перемещаются почти в строго горизонтальном направлении.

Чтобы правильно учесть механическую работу, затрачиваемую на транспорте, нужно силу тяги умножить на пройденный путь.

В примере с электровозом и поездом скорость за 2 мин. возросла от 0 до 10 *м/сек*. Следовательно, средняя скорость была равна 5 *м/сек*. За 2 мин. (или 120 сек.) поезд прошел

$$5\ м/сек \times 120\ сек. = 600\ м.$$

Работа, затраченная электровозом, равна при таких условиях:

$$64\,200\ кГ \times 600\ м = 38\,520\,000\ кГм,$$

или 38,52 тонна-километра.

Иногда работу измеряют другой единицей — киловатт-часом (*квт. ч*).

Путем расчетов установлено, что

$$1\ квт \cdot ч = 360\,720\ кГм.$$

Обычно киловатт-час применяется как электрическая единица, поэтому может вызвать удивление то, что мы применили ее для измерения механической работы.

Чтобы разобраться в этом вопросе, нужно сказать, что работа никогда не может возникать без связи с другими видами движения.

Электровоз только потому мог тянуть поезд, что он питался электрическим током. Можно сказать, что этот электрический ток передал электродвигателям электровоза соответствующую способность совершить работу. Только поэтому электровоз и осуществил работу в действительности. Отсюда следует, что механическую работу по существу можно измерять и электрическими единицами.

Не всегда поезда водят электровозы. Применяются для этой цели также паровозы и тепловозы.

В топке паровоза сжигают обычно каменный уголь, а в двигателях тепловоза — нефтяное топливо. Следовательно, уголь и нефть содержат в себе тоже какой-то «запас работы», который освобождается при их сгорании сначала в виде теплоты, а потом переходит в механическую работу. (Подробнее об этом см. в статье «Физические принципы работы тепловых машин».)

Способность тела совершить работу определяется его энергией. Итак, энергия — это скрытая в той или иной форме способность тела совершить работу.

МОЩНОСТЬ

Чтобы получить механическую работу, очень часто применяют различные двигатели. Назначение двигателя состоит в том, чтобы преобразовывать в работу какой-либо вид энергии. Например, двигатель автомашины преобразует в работу ту энергию, которая скрыта в молекулах бензина. Этот бензин сжигают в цилиндрах двигателя. Образовавшийся при сжигании раскаленный газ с большой силой давит на поршень, находящийся в цилиндре, и переме-

щает его. Движение поршня передается через систему механизмов колесам автомашины. Таким образом, мы имеем здесь ряд превращений энергии: сначала химическая энергия топлива переходит в теплоту, потом теплота превращается в механическую работу. Эта работа передается от вала двигателя через разные механизмы (коробка скоростей, кардан, задний мост) колесам автомашины.

Характерной особенностью каждого двигателя является его способность производить заданную работу в определенное время. Обычно двигатель оценивают по его мощности. Мощностью называют работу, производимую двигателем в единицу времени.

Можно написать:

$$Мощность = \frac{Работа}{Время}.$$

Мощность можно измерять килограммометрами в секунду.

Часто для измерения мощности применяют следующие единицы:

1 лошадиная сила = 75 *кГм/сек*,
1 киловатт = 102 *кГм/сек*.

Раньше мы выяснили, что работа равняется силе, умноженной на путь. Поэтому можно написать:

$$Мощность = Сила \frac{Путь}{Время}.$$

Мы знаем, что путь, деленный на время,— это скорость. Следовательно,

$$Мощность = Сила \times Скорость.$$

Полученный результат понятен и без особых расчетов. Очевидно, мощность двигателя должна быть тем больше, чем больше сила, вызывающая движение, и чем больше скорость этого движения.

Из приведенного соотношения следует также:

$$Сила = \frac{Мощность}{Скорость}.$$

Это очень важное равенство. Из практики хорошо известно, что сила тяги любой автомашины или трактора тем больше, чем меньше скорость их движения при полном числе оборотов двигателя в единицу времени. Чтобы обеспечить различные скорости движения при полном числе оборотов двигателя в единицу времени, т. е. при полной мощности, делают коробку скоростей.

Коробка скоростей имеет систему шестерен, которые можно соединять по-разному и таким способом менять скорость движения, не меняя числа оборотов двигателя в единицу времени.

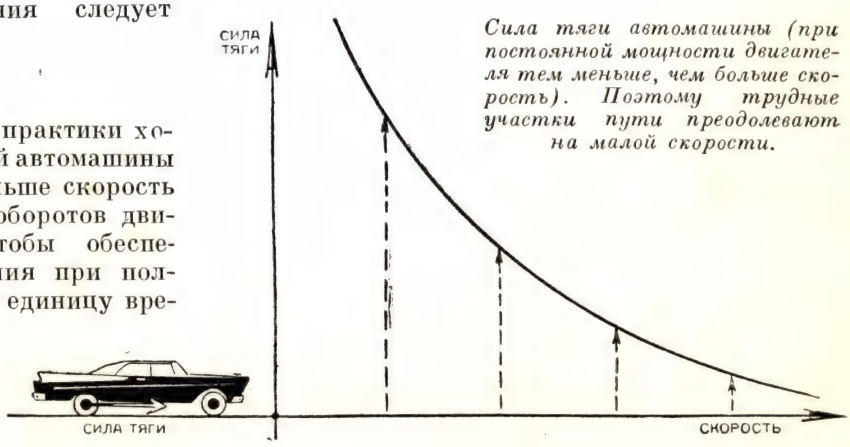
Чем труднее дорога или чем более тяжелый груз нужно везти, тем больше снижают скорость автомашины или трактора и тем более значительную силу тяги они развивают.

Число этих примеров можно увеличивать почти беспредельно, если обратиться к работе разнообразнейших машин, а также если наблюдать силы, действующие в окружающей нас природе. Однако замечательным является то, что, как бы ни были разнообразны и непохожи друг на друга отдельные явления, такие понятия, как сила, энергия, работа, мощность, можно применить везде. Здесь проявляется единство в движении окружающей нас материи. Из этого единства вытекает возможность использования в науке единых способов решения весьма различных задач, в частности определения силы, работы, энергии.

ЗАКОН СОХРАНЕНИЯ ЭНЕРГИИ

Рассмотренные примеры убеждают нас в том, что энергия может переходить из одних форм в другие. Всякий вид энергии должен иметь какой-то источник. Это значит, что энергия не может возникать из ничего. Однако такое утверждение хотя и бесспорно, но все же является неполным, незаконченным.

Дело в том, что энергия не только не может возникать из ничего, но не может и исчезать бесследно. В примере с поездом энергия, затраченная на движение поезда, пошла на преодоление трения колес о рельсы и осей



Сила тяги автомашины (при постоянной мощности двигателя тем меньше, чем больше скорость). Поэтому трудные участки пути преодолевают на малой скорости.

в подшипниках. Это трение вызвало некоторое нагревание колес, рельсов, осей и подшипников.

Кроме того, энергия пошла на сотрясение грунта, которое привело к небольшому нагреванию грунта. Известная доля общей энергии пошла на преодоление сопротивления воздуха, что немного нагрело воздух.

Из этого видно, что часть работы электровоза перешла в теплоту.

Другая часть работы перешла в энергию движения поезда, которую называют кинетической энергией. Этот вид энергии запасен в движущейся массе. Если бы мы хотели остановить движение, мы должны были бы перевести кинетическую энергию в какой-то другой вид энергии. Самым простым способом решения такой задачи является торможение. Если мы хотим остановить поезд, нужно привести в действие тормоза. Тормоза зажимают обод колеса или особый диск, укрепленный на оси, и создают большую силу трения. Кроме того, колеса при торможении замедляют свое вращение и частично скользят по рельсам. Все это вызывает выделение теплоты. В эту теплоту превращается энергия движения, и поезд постепенно останавливается.

Возможно также и электрическое торможение, при котором электродвигатели электровоза переключаются так, что становятся генераторами электрического тока. Тогда энергия движения поезда идет на вращение этих генераторов, и поезд останавливается, отдавая свою энергию в виде энергии электрического тока, идущего в сеть электрифицированной железной дороги.

Из всего сказанного видно, что энергия не только не возникает из ничего, но и не исчезает бесследно. Энергия может переходить из одних форм в другие, переходить от одних тел к другим, но общее ее количество не может изменяться ни при каких условиях. Этот закон был открыт в XIX в. Робертом Майером и Гельмгольцем, а углубленная философская трактовка этого закона была дана Энгельсом. Называется этот закон законом сохранения и превращения энергии.

ЗАКОН СОХРАНЕНИЯ МАТЕРИИ

Закон сохранения энергии — это частный случай более общего закона сохранения материи. Как известно, материей называется в целом все то, что существует независимо от нашего сознания.

Мы уже установили раньше, что материи свойственно движение. Это движение может быть весьма различным, но, несмотря на такие различия, существует возможность выразить это движение в самой общей мере. Для этой цели можно использовать такое понятие, как энергия.

Энергия является одной из основных количественных характеристик материи.

Другой не менее важной характеристикой материи является масса. Масса определяет собой способность материи сохранять имеющееся у нее движение, а также и силу взаимного притяжения отдельных тел. Подобно закону сохранения энергии, существует также и закон сохранения массы.

Этот закон впервые был открыт в середине XVIII в. гениальным русским ученым Михаилом Васильевичем Ломоносовым и впервые изложен им в письме академику Леонарду Эйлеру.

Если выделить совершенно изолированную систему тел, то при всех условиях общая энергия и общая масса этих тел остаются совершенно неизменными.

В этом состоит закон сохранения материи: материя вечна, и ее количество во Вселенной неизменно. Материя не может исчезнуть бесследно или возникнуть из ничего.

Закон сохранения материи — основной закон естествознания.

Этот закон — одна из главных основ материалистического понимания мира. Он подкреплен всем опытом практической деятельности человечества и является основой развития науки и техники.

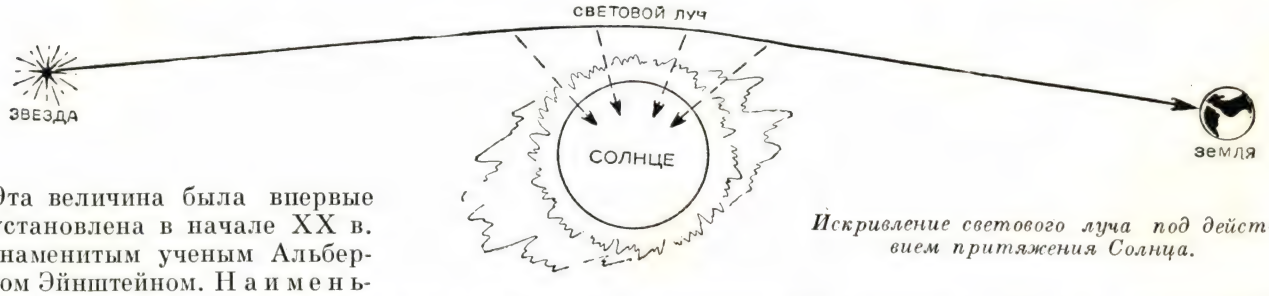
В наши дни этот закон находит себе все новые подтверждения при изучении других звездных систем, из которых состоит вся видимая Вселенная.

Таблица 6. С древних времен человеку приходится измерять расстояния, предметы, промежутки времени. С развитием науки и техники совершенствовались методы измерения и измерительные приборы. Некоторые приборы и эталоны, которые издавна применялись для измерений времени и расстояний, показаны на этом рисунке: *1.* Песочные часы. *2.* Водяные часы. *3.* Косая сажень. *4.* Ярд. *5.* Фут. *6.* Дюйм. *7.* Парижский меридиан и эталон метра. *8.* Начало звездных суток определяют при прохождении звезды через меридиан.

1
2
3
4
5
6
7
8

АРХИМЕД

Кроме этого, следует иметь в виду, что масса и энергия не могут существовать независимо друг от друга. Если от одного тела другому телу передается энергия, то вместе с этой энергией передается всегда и некоторая масса. Количество массы, передаваемое таким способом, может быть различным. Однако при передаче определенного количества энергии количество передаваемой массы не может быть меньше совершенно определенной величины.



Искривление светового луча под действием притяжения Солнца.

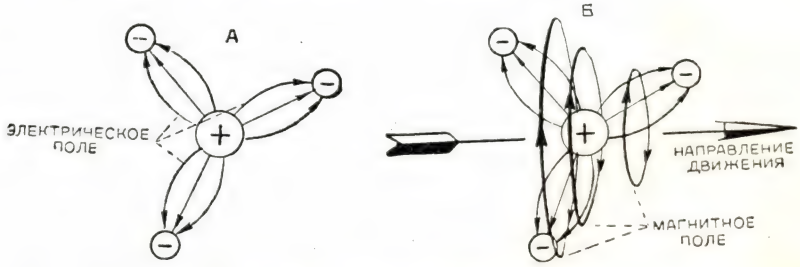
Эта величина была впервые установлена в начале XX в. знаменитым ученым Альбертом Эйнштейном. Наименьшая масса, передаваемая вместе с определенным количеством энергии, равна передаваемой энергии, деленной на квадрат скорости света в пустоте. Скорость света равна округленно 300 млн. *м/сек*. Квадрат этой скорости равен $9 \cdot 10^{16}$.

При делении на такую величину обычно получается очень малая масса. Все же эта масса не всегда близка к нулю. Например, масса, переносимая энергией взрыва атомной бомбы среднего калибра, равна примерно одному грамму.

Из сказанного видно, что любой носитель энергии должен подчиняться закону всемирного тяготения, даже лучи света. Очень точными наблюдениями установлено, что лучи звезд, проходя вблизи Солнца, немного искривляются. Другими словами, частицы света, фотоны, летящие со скоростью света, имеют массу и притягиваются к Солнцу в соответствии с законом всемирного тяготения, который мы уже рассмотрели в этой статье, знакомясь с различными видами сил. В этом проявляется поразительное единство и взаимосвязь весьма различных видов материи.

СКОРОСТЬ СВЕТА — ЭТО ПРЕДЕЛЬНАЯ СКОРОСТЬ ЛЮБОГО ДВИЖЕНИЯ

Если какая-нибудь сила действует на какую-либо массу и сообщает ей определенную скорость, то эта масса не может оставаться постоянной. Как мы уже видели на примере с поездом, движущаяся масса имеет энергию движения, или кинетическую энергию. Следовательно, сила, увеличивая скорость массы, передает ей определенную энергию. Но мы установили в предыдущем разделе, что нельзя передавать массе энергию, не передавая некоторой дополнительной массы. Отсюда следует, что при увеличении скорости движения масса движущегося тела должна расти.



При движении масса атома увеличивается потому, что возникает магнитное поле, имеющее массу, равную энергии движения, деленной на квадрат скорости света.

На первый взгляд это может показаться невероятным. Как может расти масса тела при увеличении скорости движения, если само тело остается неизменным? Например, как может увеличиться масса самолета, который летит, по сравнению с массой неподвижного самолета?

Ответ на такой вопрос требует проникновения в тончайшие детали строения вещества. Можно рассмотреть, в частности, следующий пример. Известно, что любое тело состоит из

Таблица 7. Простые машины — рычаги, клин, блоки — изобретены человеком в глубокой древности. Или пользовались еще при строительстве египетских пирамид. Но и в наши дни они не потеряли своего значения: рычаги, клин, блоки являются элементами самых сложных механизмов нашего времени.

мельчайших частиц — молекул и атомов. Атомы в свою очередь построены из атомных ядер и электронов.

Атомные ядра заряжены положительным электричеством, а электроны — отрицательным. Между положительными и отрицательными электрическими зарядами имеется пространство, в котором действуют электрические силы. Это пространство называется электрическим полем. Оно заполнено электрическими силовыми линиями. Электрическое поле представляет собой особую форму материи.

Если электрическое поле или заряд перемещаются, то вокруг них появляются новые силы, называемые магнитными; их охватывает возникающее при этом магнитное поле.

Чем быстрее движение атомов, тем сильнее возникающие в них магнитные поля. Магнитное поле — это тоже особый вид материи, обладающий, как и всякая другая материя, определенной массой. Если тело увеличивает скорость, то в его атомах растут магнитные поля и за счет этого увеличивается масса тела.

Опытами и расчетами установлено, что масса магнитного поля равна энергии, заключенной в этом поле, деленной на квадрат скорости света. Таким образом, масса магнитного поля равна той наименьшей массе, какую надо передать телу при передаче ему энергии. Здесь-то и выполняется закон сохранения массы — сколько массы передано этому телу, настолько масса его и увеличится.

Отсюда становится ясным, почему масса движущихся тел растет при увеличении скорости. Отсюда также вытекает, что, для того чтобы сообщить какому-либо телу определенное ускорение, надо по мере роста скорости непрерывно увеличивать силу.

Если скорость тела приближается к скорости света, то масса тела должна была бы возрасти до бесконечности. Что это значит?

Это значит, что дальнейшее ускорение становится невозможным и скорость света является пределом скорости всякого движения. Мы видели выше, что ускорение прямо пропорционально силе и обратно пропорционально массе. Если масса, возрастая, стремится к бесконечности, то ускорение снижается до нуля.

Таким образом, механика очень больших скоростей должна строиться с учетом изменения массы тел при росте их скорости. При малых скоростях изменения массы не учитывают. Обычно механику, в которой изменение массы при движении не учитывается, называют классической механикой. Эта механика нашла широкое применение в технике.

Механика, в которой учтено изменение массы, рассмотренное нами, называется релятивистской механикой, т. е. основанной на теории относительности (выдвинутой Эйнштейном). Эта теория впервые установила, что масса тела при увеличении его скорости увеличивается.

Релятивистская механика имеет огромное значение для различных областей науки и техники.

В беспредельных пространствах Космоса движутся звезды, газовые облака и массы космической пыли. Кроме того, космическое пространство пронизывают элементарные частицы. Все эти тела движутся с различными скоростями. В некоторых случаях скорости достигают огромных величин. Поэтому движение тел в Космосе и вообще все явления, наблюдаемые в бескрайнем космическом пространстве, было бы совершенно невозможно понять без релятивистской механики. Таким образом, релятивистская механика — одна из основ современной астрономии и астрофизики (физики звезд).

Не меньшее значение имеет релятивистская механика и для понимания строения и движения элементарных частиц, образующих вещество. В настоящее время особое значение приобретает изучение атомных ядер. Это изучение связано с извлечением огромных количеств энергии при расщеплении и синтезе атомных ядер. Здесь таятся неисчислимые возможности для энергетики будущего. Это одна из главных проблем естествознания. Вся она основывается на релятивистской механике и без нее не могла бы даже возникнуть.

В настоящее время изучение элементарных частиц в значительной мере основано на том, чтобы воздействовать на них ударом других частиц. Для этого применяют особые приборы — ускорители элементарных частиц (бетатроны, циклотроны, синхрофазотроны и т. д.). Все эти приборы можно рассчитать и построить, только используя принципы релятивистской механики. Если полвека назад релятивистская механика была специальной, отвлеченной областью теоретической физики, то сейчас она стала основой широких областей естествознания и техники, в частности всей атомной энергетики будущего.

ЗВУК И УЛЬТРАЗВУК

ЗВУК

Звуки, самые разнообразные, наполняют окружающий нас мир, а тишина бывает сравнительно редко. Абсолютная тишина наступает лишь тогда, когда органы слуха — уши — перестают воспринимать звук.

Но что именно воспринимаем мы как звук?

Ответ на этот вопрос дает учение о звуке — акустика, одна из отраслей физики. Как и всякая наука, она сложилась постепенно и уходит своими корнями в далекое прошлое.

Раньше всего было замечено, что звуки порождаются телами, вибрирующими в воздухе.

Аристотель полагал, что звучащие тела создают попеременное сжатие и разрежение воздуха.

Таким образом, первый вывод, который был сделан при изучении природы звука,— связь звука с воздухом, с атмосферой, окружающей Землю.

И эта догадка была правильной.

Если тело, звучащее в воздухе, поместить в безвоздушное пространство, оно перестанет звучать. Поэтому, чтобы уяснить себе процесс образования звуков, надо подробнее познакомиться с некоторыми свойствами воздуха.

УПРУГОСТЬ ВОЗДУХА

Мы остановимся на свойстве воздуха, которое имеет непосредственное отношение к рождению и распространению звука. Это свойство — упругость.

То, что воздух обладает упругостью, ученые установили давно. Однако долго оставалось неясным, благодаря чему он обладает этим свойством.

Жидкости способны передавать давление одинаково во все стороны, потому что они практически несжимаемы. Но воздух! Он так податлив! Почему же и он передает давление совершенно так же, как жидкость?

Изучением упругих свойств воздуха занимались многие ученые — Торричелли, Паскаль, английский физик Роберт Бойль, француз Мариотт. Они сделали немало важных открытий в этой области, но причину упругости воздуха им установить не удалось. Это сделал великий русский ученый Михаил Васильевич Ломоносов.

Исходя из того, что воздух представляет собой смесь различных газов, состоящих из частичек вещества — атомов, Ломоносов пришел к выводу, что каждый газ в отдельности и смесь газов в целом обладают упругостью потому, что их атомы все время находятся в движении. Поясняя эту мысль, Ломоносов писал:

«Свойство упругости проявляют не единичные частички, не имеющие какой-либо физической сложности и организованного строения, но производит совокупность их».

При этом, продолжая свои рассуждения, Ломоносов утверждал, что сила упругости обусловлена *взаимным действием частиц между собой:*

«Так как эта сила при прочих равных условиях увеличивается и уменьшается в отношении плотности собственной материи воздуха, то нет сомнения, что она происходит от какого-то непосредственного взаимодействия атомов».

Размышляя над взаимодействием частиц воздуха, Ломоносов не упускал из виду то, что воздух можно сжимать, а это означает, что между частицами существуют значительные расстояния и, следовательно, они действуют друг на друга, когда сталкиваются. Время столкновения, как полагал Ломоносов, длится весьма недолго.

Об этом он пишет следующим образом:

«Очевидно, что отдельные атомы воздуха, взаимно приблизившись, сталкиваются с ближайшими в нечувствительные моменты времени, и, когда они находятся в соприкосновении, вторые атомы друг от друга отпрыгнули, ударились в более близкие к ним и снова отскочили; таким образом, непрерывно отталкиваемые друг от друга частыми взаимными толчками, они стремятся рассеяться во все стороны».

Резиновая камера мяча становится упругой после того, как ее наполнят воздухом.

Взвешивая два одинаковых сосуда после того, как из одного воздух был удален, Галилео Галилей обнаружил, что воздух имеет вес.

Эти выводы Ломоносова помогли уяснить общее «поведение» атмосферы. Воздух — смесь газов. Молекулы газов находятся в непрерывном хаотическом движении. Если бы не притяжение Земли, то стремление воздуха занять как можно больший объем рассеяло бы атмосферу. Падению молекул газов на Землю препятствует их взаимодействие. Действие силы тяжести сказывается в том, что нижние слои атмосферы плотнее верхних. В своем хаотическом движении молекулы сталкиваются друг с другом. Между двумя столкновениями молекула проходит совсем маленькое расстояние. После каждого столкновения изменяется скорость и направление движения. Молекулы как бы топчутся на одном месте. При сближении молекул на очень малые расстояния между ними возникают силы отталкивания, а разлетевшись в разные стороны, они вновь притягиваются друг к другу. Это происходит потому, что на малых расстояниях между молекулами преобладают силы отталкивания, а на больших — силы притяжения. Благодаря силам притяжения и отталкивания, действующим между молекулами воздуха, молекулы все время движутся, а весь воздух в целом обладает упругостью.

Вес воздушной оболочки Земли создает атмосферное давление, и благодаря упругости давление это передается во все стороны.

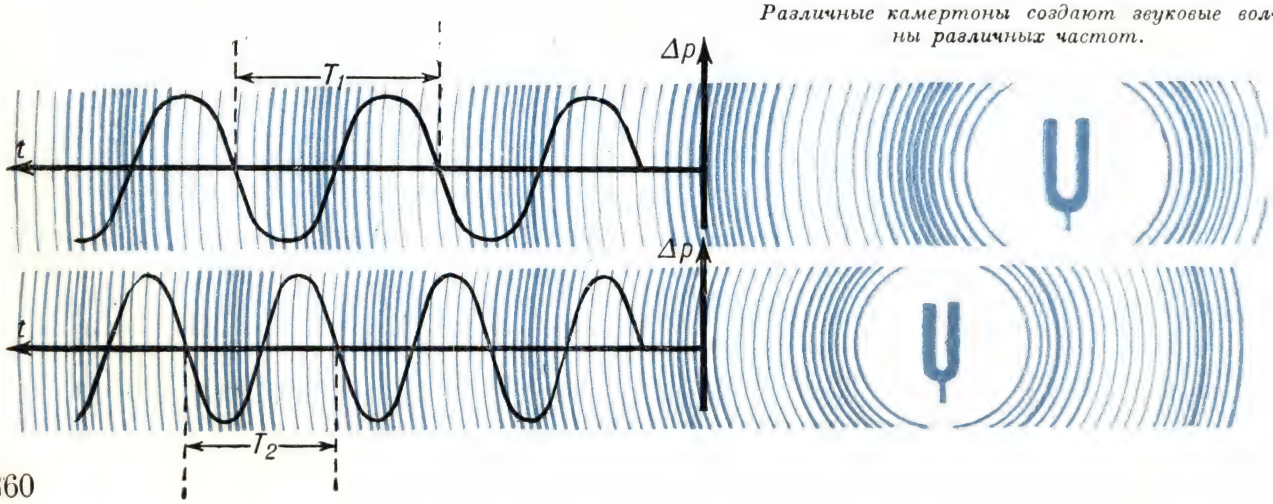
Теперь рассмотрим, что происходит, когда находящееся в воздухе тело совершает колебания. Когда тело отклоняется из положения равновесия, оно с одной стороны сжимает прилежащий к нему слой воздуха, а с другой — разрежает. При сжатии воздуха, как обнаружил Бойль, его упругость увеличивается, а следовательно, увеличивается и давление.

Таким образом, при движении колеблющегося тела давление воздуха становится чуть-чуть больше атмосферного с той стороны, в которую тело движется, и настолько же меньше с противоположной стороны.

Достигнув наибольшего отклонения, тело возвращается к положению равновесия и, пройдя его, создает теперь сжатие в том месте, где прежде было разрежение, и разрежение там, где было сжатие. Таким образом, сжатия воздуха сменяются разрежениями через промежуток времени, равный периоду колебаний. Чередующиеся сжатия и разрежения благодаря упругости воздуха передаются от слоя к слою, распространяясь во все стороны. И так происходит до тех пор, пока не прекратится колебание тела.

Распространение сжатий и разрежений от

Различные камертоны создают звуковые волны различных частот.



слоя к слою называют упругой волной в воздухе. Когда распространяется упругая волна, то в каждой точке атмосферы, которой она достигает, происходит периодическое изменение величины атмосферного давления. Давление, избыточное над атмосферным, называют акустическим. Частота колебаний величины атмосферного давления зависит от частоты колебаний тела, которое порождает упругую волну. Различные тела могут совершать колебания с различными частотами, порождая в воздухе упругие волны различных частот.

Восприятие изменений акустического давления нашим ухом происходит только тогда, когда частота этих изменений достигает 16—20 *гц*[1] и не превышает 16—20 тыс. *гц*. Упругие волны, частота которых находится в этих пределах, называют звуковыми волнами или просто звуком.

Оба колокольчика излучают звуковые волны одинаковых частот. Длина звуковой волны больше в той среде, где больше скорость ее распространения.

Расстояние между двумя ближайшими слоями воздуха, где одновременно наступает сжатие или разрежение, называют длиной звуковой волны.

Звук может распространяться не только в воздухе, но и в других средах. Длина звуковой волны зависит от скорости распространения звука в этой среде, а скорость звука определяется физическими свойствами среды: плотностью и упругостью.

В воздухе при температуре нуль градусов по Цельсию и нормальном давлении звук распространяется со скоростью 332 *м/сек*, в морской воде—со скоростью около 1500 *м/сек*, а в твердых телах скорости распространения достигают 5000 *м/сек*. К таким телам относятся сталь и алюминий.

ЭНЕРГИЯ ЗВУКОВОЙ ВОЛНЫ И СИЛА ЗВУКА

Молекулы воздуха все время находятся в тепловом движении. Если в воздухе распространяется звуковая волна, то каждый слой, перпендикулярный к направлению распространения этой волны, подвергается попеременно сжатию и разрежению. Частицы воздуха, помимо теплового движения, приобретают дополнительное колебательное движение. Это движение происходит в направлении распространения звуковой волны, поэтому звуковую волну называют продольной. Звуковые волны несут с собой энергию, которую сообщает им источник звука.

Чтобы уяснить процесс распространения энергии, движущейся со скоростью звуковой волны, нужно обратить внимание на особенность колебания многих частиц, между которыми существуют силы взаимодействия.

Однако прежде обратимся к простейшему случаю: рассмотрим колебание математического маятника. В крайних положениях скорость движения маятника равна нулю; наибольшего значения она достигает в тот момент, когда маятник проходит положение равновесия. Это означает, что в крайних положениях кинетическая энергия обращается в нуль, а в положении равновесия она достигает наибольшего значения.

Кинетическая энергия маятника расходуется на изменение его положения относитель-

[1] Герц (сокращенно *гц*) — 1 колебание в секунду.

но поверхности Земли, т. е. на увеличение потенциальной энергии. Общий запас энергии остается неизменным, если, разумеется, устранено трение.

Когда происходит колебание упругой среды, например воздуха, где много частиц, наблюдается иная картина.

В слое, где происходит сжатие воздуха (вследствие чего увеличивается давление), возрастает не только кинетическая энергия частичек воздуха, о чем свидетельствует повышение температуры, но и их потенциальная энергия.

Не означает ли это, что в данном случае нарушается закон сохранения энергии?

Нет! Такого явления природа не знает. Просто в тот момент времени, когда в одном слое воздуха кинетическая и потенциальная энергия частичек возрастает, в близлежащем слое оба вида энергии соответственно убывают.

Таким образом, энергия, которую сообщает частичкам излучатель, передается от слоя к слою по направлению распространения волны. Этот процесс перетекания энергии от источника в окружающую среду длится в течение всего времени колебания тела.

Русский ученый Н. А. Умов вычислил величину кинетической энергии, протекающей за одну секунду через один квадратный сантиметр поверхности, перпендикулярной к направлению распространения волны. Эту величину называют потоком энергии. Величина потока энергии служит мерой интенсивности звука, или, как говорят, мерой силы звука. Измеряется она в ваттах на *кв. см* (*вт/см*^{2}).

Сила звука пропорциональна квадрату звукового давления, т. е. квадрату величины давления, избыточного над атмосферным, которое образуется вследствие сжатия слоя.

Поток энергии звуковой волны человеческого голоса очень мал. Представим себе, что одновременно говорят сто тысяч человек. Энергия звуковых волн их голосов, если превратить ее в электрическую, настолько мала, что ею с трудом можно было бы зажечь лампочку карманного электрического фонарика. Мощность одновременного разговора всех людей на земном шаре едва ли больше мощности автомобиля «Москвич».

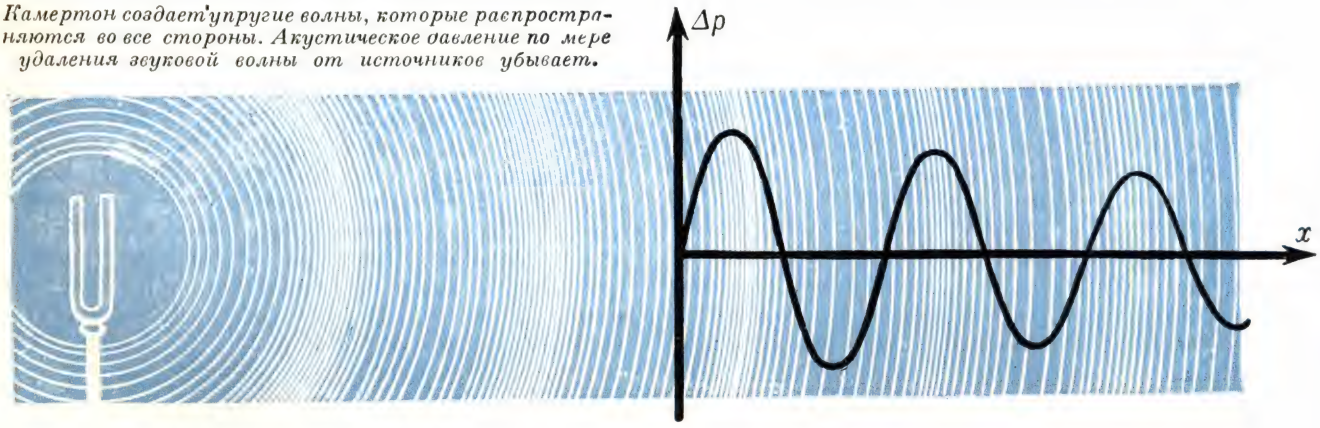
Мы знаем, что звук распространяется во все стороны, поэтому величина потока энергии по мере удаления от источника проходит через поверхность шара все увеличивающегося радиуса. Энергия, протекающая через единицу поверхности, убывает обратно пропорционально квадрату расстояния данной точки от источника.

Таким образом, с увеличением расстояния от источника звука величина потока энергии становится все меньше, а звук — все слабее. Это обстоятельство заставило человека создать устройства, которые позволяют направлять поток звуковой энергии в одном определенном направлении.

Если, например, мы хотим кого-либо окликнуть на большом от нас расстоянии, мы обычно подносим ко рту ладони, направляя тем самым весь поток звуковой энергии в нужную нам сторону.

По этому же принципу устроен рупор. Рупор создает направленную звуковую волну, поток энергии которой не рассеивается в окружающем пространстве, а концентрируется в одном пучке. Кроме того, рупор увеличивает звучащую поверхность, а чем она больше, тем больше энергии отдает окружающей среде звучащее тело. Это свойство используется и в музыкальных инструментах (дека рояля, кор-

Камертон создает упругие волны, которые распространяются во все стороны. Акустическое давление по мере удаления звуковой волны от источников убывает.



пус скрипки, раструбы у духовых инструментов).

Рупор, как описывают историки походов греческого полководца Александра Македонского, помогал ему командовать войсками во время сражений. В грохоте боя было трудно разобрать слова команды, но, если отдавать ее через рупор, она становилась хорошо слышимой на больших расстояниях.

В наше время в радиовещании форма рупоров для громкоговорителей выбирается с таким расчетом, чтобы звук необходимой силы распространялся по заранее выбранному направлению.

ТОН, ВЫСОТА, ТЕМБР И ГРОМКОСТЬ ЗВУКА

Понятие тона как характеристики звука ввел в учение о звуке Галилео Галилей. Высота тона определяется частотой колебаний звучащего тела. Если частота колебаний мала, то звук будет низкого тона; если частота колебаний велика, то звук будет высокого тона.

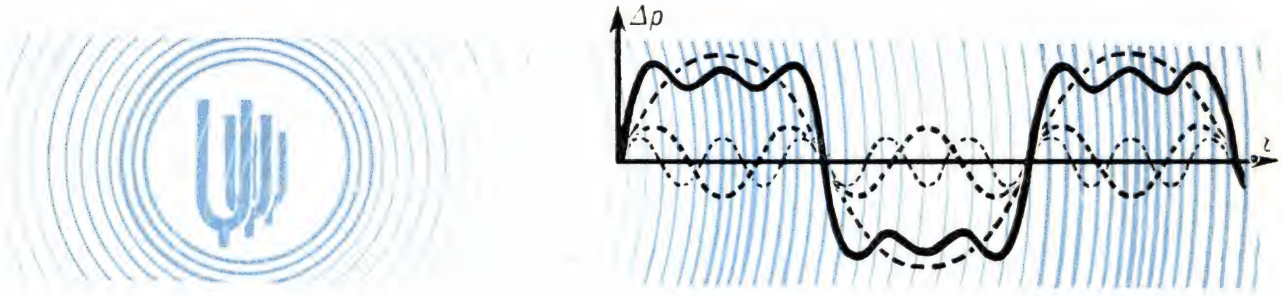
Если бы звучащие тела создавали колебания только одной единственной частоты, то мы не смогли бы различать музыкальные инструменты, голоса людей. Однако всякое звучащее тело создает целую смесь тонов, отличающихся по высоте и силе. Наиболее низкий из них называют основным тоном. Более высокие тона, сопровождающие основной тон, называют обертонами.

Разное количество обертонов, подобно световым оттенкам основного цвета, «окрашивает» звук. Звучание основного тона совместно с обертонами создает звуковое восприятие, которое называют тембром звука. Каждому музыкальному инструменту и голосу присущ свой тембр.

Отличие одного тембра от другого обусловлено различным числом и силой обертонов, сопровождающих звучание основного тона. Чем больше обертонов в звучании основного тона, тем приятнее тембр звука.

Голоса некоторых людей, как говорят, имеют «металлический» оттенок, а у других — «мягкий, бархатистый». Такое различие в голосах обусловлено числом и силой обертонов. Если высокие тоны преобладают над низкими, то говорят, что в голосе слышится «звучание металла». Если же преобладают низкие тоны, то голос более мягкий. При этом нельзя упускать из виду, что восприятие голоса на слух зависит не только от количества и силы звука сопровождающих основной тон обертонов, но и от чувствительности уха к тонам различной высоты.

Характеристикой воспринимаемого ухом звука является громкость. Сложность этого понятия в том, что громкость связана с чувствительностью уха и психическим восприятием.



Частоты звуковых волн трех камертонов относятся, как 1:2:3. При совместном звучании они создают сложное колебание величины акустического давления.

Колебание одной и той же частоты, распространяясь в воздухе, может создавать различное избыточное над атмосферным давление. Если создаваемое избыточное давление незначительно, то звук слабый, еле слышимый. При значительном избыточном давлении звук громкий. Каких же значений может достигать величина звукового давления? Широким пределам звукового давления, воспринимаемого ухом,

приходится удивляться. Ухо способно воспринять такое малое изменение давления, как, например, сотая часть миллионной доли грамма на квадратный сантиметр, и изменение давления в сто миллионов раз больше.

Порогом слышимости называют самое незначительное изменение давления, воспринимаемое ухом.

Что касается восприятия на пороге слышимости, то для малых частот давление должно быть выше, чем для больших, чтобы звуки были одинаковой громкости. Так как звуковое давление низкого тона всегда больше, чем давление высоких тонов, входящих в звучание, то тембр звука определяется не только числом высоких и низких тонов, но и соотношением звуковых давлений между ними.

Благодаря этому обстоятельству ухо отличает один тембр от другого, так как оно способно сразу разобраться во всей совокупности тонов сложного звука. Это называется способностью уха анализировать звук.

ВОСПРИЯТИЕ ЗВУКА ОРГАНОМ СЛУХА

Как устроен слуховой орган — ухо?

Ушная раковина с начинающимся слуховым проходом называется наружным ухом.

Слуховой проход заканчивается барабанной перепонкой. За ней — область среднего уха, состоящего из полости, заполненной воздухом, и трех слуховых косточек. Первая из них, молоточек, одним концом сочленена с барабанной перепонкой, другим — с наковальней. Наковальня соединена с третьей косточкой — стременем.

Стремя упирается в перепонку, отделяющую среднее ухо от внутреннего.

Молоточек, наковальня и стремя — это рычажный механизм, передающий колебание барабанной перепонки во внутреннее ухо.

Внутреннее ухо представляет собой свернутый улиткой и наполненный жидкостью лабиринт.

При тишине давление воздуха с обеих сторон барабанной перепонки одинаково и она находится в состоянии покоя.

При увеличении давления воздуха в наружном ухе барабанная перепонка прогибается внутрь. При этом воздух, имеющийся внутри среднего уха, сжимается. Когда давление воздуха в наружном ухе уменьшается, барабанная перепонка благодаря упругости воздуха в среднем ухе прогибается в противоположную сторону.

Периодическое изменение величины акустического давления приводит к периодическим движениям барабанной перепонки. Колебание барабанной перепонки приводит в движение молоточек, наковальню и стремя. Стремя, заставляет разделяющую среднее и внутреннее ухо перепонку совершать колебания. В жидкости, заполняющей лабиринт, возникают упругие волны, которые приводят в движение имеющуюся в улитке мембрану.

Мембрана соприкасается с кончиками корешков слуховых нервов, которые передают раздражение в мозг. Это раздражение и воспринимается мозгом как звук.

КАК ОБЪЯСНИТЬ НАШУ СПОСОБНОСТЬ ОПРЕДЕЛЯТЬ, ОТКУДА ПРИХОДИТ ЗВУК

Представьте себе, что вас кто-либо окликнул. Услышав голос, вы поворачиваете голову именно в том направлении, откуда он донесся. Почему? Оказывается, слуховые раздражения от каждого уха приходят в мозг одновременно только в том случае, если источник звука находится от них на равном расстоянии. Голову мы всегда поворачиваем в ту сторону, откуда звуковое раздражение пришло в мозг первым.

Таким образом, восприятие звука обоими ушами дает возможность определять положение источника звука. Это свойство нашего слуха называется бинауральным эффектом. Его используют для создания стереофонического звучания в кино.

При демонстрации стереофонически озвученных фильмов звуки воспроизводят динамики, расположенные в различных точках кинозала.

МУЗЫКАЛЬНЫЕ ТОНЫ И ШУМЫ

Все звуки можно подразделить на два вида. музыкальные тоны и шумы.

Звук называют музыкальным, если изменение акустического давления, которое воспринимает ухо, повторяется регулярно, через равные промежутки времени.

Звук перестает быть музыкальным, и его называют шумом, когда изменение акустического давления происходит беспорядочно.

Особый интерес представляют собой созвучия — одновременное звучание нескольких тонов.

Различают два вида созвучий: консонанс и диссонанс.

Чтобы понять суть этих явлений, надо прежде всего остановиться на самом простом созвучии — одновременном звучании двух тонов. Каждый из них имеет свою частоту колебаний. Отношение частот колебаний двух тонов называют интервалом. Если отношение частот равно 1 : 1, интервал называют унисоном. При отношении частот, равном 1 : 2, интервал называют октавой; если же оно равно 2 : 3 — квинтой, а при отношении частот 3 : 4 — квартой.

Наконец, отношение частот 4 : 5 называют большой терцией и 5 : 6 — малой терцией.

Если два тона очень мало отличаются друг от друга по частоте, то их совместное звучание создает своеобразное завывание — биение.

Это явление заключается в периодическом усилении и ослаблении совместного звучания.

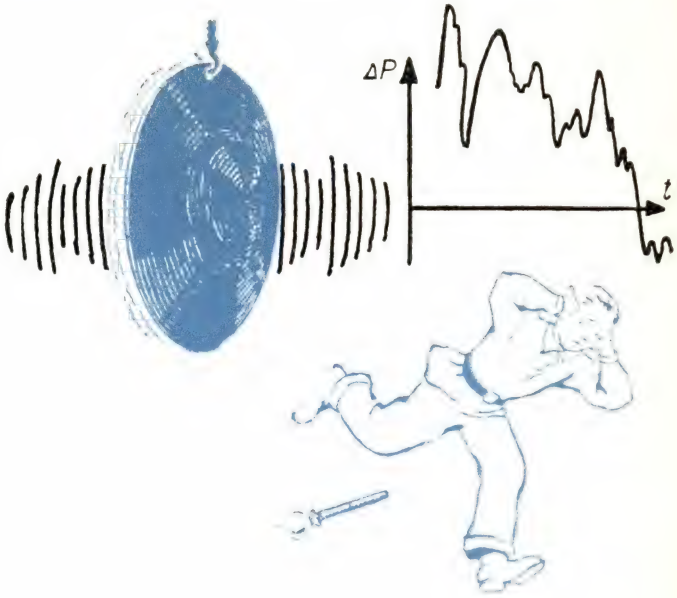
Количество усилений слышимого звука в одну секунду называют частотой биений. При малой частоте биений (не больше четырех усилений в секунду) они не вредны для слухового восприятия.

Если частота биений достигает трех десятков в секунду и в особенности тридцати трех, звуковое ощущение нетерпимо. Однако при большей частоте (около 130 усилений в секунду) влияние биений на звуковое ощущение исчезает.

Уяснение этого явления весьма важно для понимания построения музыкальных созвучий. Дело в том, что при звучании струн, кроме основного тона, всегда имеются верхние тоны (их называют обертонами). Рассмотрим для примера две струны, основные частоты которых — 200 *гц* и 400 *гц*. Отношение частот в этом случае равно 1 : 2, т. е. интервал составляет октаву.

Предположим, что каждая из них имеет шесть тонов. Тогда первая струна будет звучать так:

200 *гц* — основной тон,
400 *гц* — первый обертон,
600 *гц* — второй обертон,
800 *гц* — третий обертон,
1000 *гц* — четвертый обертон,
1200 *гц* — пятый обертон.



Звучание второй струны содержит следующие тоны при соответствующем делении:

400 *гц* — основной тон,
800 *гц* — первый обертон,
1200 *гц* — второй обертон,
1600 *гц* — третий обертон,
2000 *гц* — четвертый обертон,
2400 *гц* — пятый обертон.

При совместном звучании обеих струн они содержат три общих простых тона: 400, 800 и 1200 *гц*. Чем больше одинаковых простых тонов в совместном звучании струн, тем бóльшая степень сродства созвучий. Биений в этом случае не наблюдается.

Такие созвучия называются консонансом.

Иная картина, если октава расстроена. Пусть, например, основной тон второй струны не 400 *гц*, а 410; тогда ее обертоны будут: 820, 1230, 1640, 2050 и 2460 *гц*. Близкие тоны: 400 и 410, 800 и 820, 1200 и 1230 *гц* — будут давать биения, частота которых 10, 20 и 30 *гц*. Созвучие подобного рода будет создавать завывание. Получается диссонанс.

Таково объяснение консонанса и диссонанса, данное физиком и физиологом Гельмгольцем.

Изучение интервалов тонов, которые дают лучшие консонансы, привело к образованию звуковой гаммы, где отношение частот строго определено.

Мажорная, или диатоническая, гамма включает тоны, частоты которых относятся, как

$1 : \frac{9}{8} : \frac{5}{4} : \frac{4}{3} : \frac{3}{2} : \frac{5}{3} : \frac{15}{8}$.

Звук, частота которого равна 65 *гц*, называют «до» первой октавы. В различных странах это число немногим отличается от 65. Если мы, например, будем полагать частоту «до» первой октавы равной 64 *гц*, то «до» второй октавы будет звук, частота которого составляет 128 *гц*, а третьей октавы — 256 *гц*.

Примем «до» третьей октавы за основной тон и согласно диатонической гамме найдем остальные шесть тонов. Числа их колебаний будут равны: «ре» — 288 *гц*; «ми» — 320 *гц*; «фа» — 341,33 *гц*; «соль» — 384 *гц*; «ля» — 426,66 *гц*; «си» — 480 *гц*.

Указанные частоты колебаний соответствуют произвольно взятой частоте колебаний «до» первой октавы.

Уточнив значение «до» первой октавы, следует соответственно пересчитать и другие тоны.

До недавнего времени тон «ля» третьей октавы был принят равным 435 *гц*. Этому значению «ля» третьей октавы соответствует «до» первой октавы — 65,25 *гц*.

Теперь принято считать «ля» третьей октавы звуком частоты 440 *гц*. Его можно систематически слышать по радио, когда подают сигналы настройки музыкальных инструментов.

Различие в частотах, выбранных для «до» первой октавы, не является особо важным, так как для музыкальных целей важно не абсолютное значение частоты, а отношение частот, т. е. величина интервала.

ЗАПИСЬ ЗВУКОВ

Звуки мелодий в глубокой древности записывали буквами, в средние века — особыми значками — невмами, которые приблизительно указывали повышение и понижение мелодии.

В X в. для уточнения высоты звука невмы стали писать на линейках, точно определяющих высоту звука, т. е. тон. Постепенное усовершенствование привело к современной записи звуков. Этим мы обязаны Гвидо Аретинскому, который изобрел систему линий, а тонам дал названия.

Затем стали записывать звуки при помощи особых значков — нот — на пяти линейках, которые назвали нотоносцами. Кроме пяти основных линеек, существуют добавочные — пять вверху и пять внизу. Что означают ноты на линейках, указывает ключ, который ставят в начале пяти линеек. Для фортепьянной музыки характерны два ключа — скрипичный и басовый. Для записи хоровой и оркестровой музыки существуют и другие ключи: «до», «соль», «фа».

Основные линейки разбиты на равные части, так называемые такты. Такт определяет длительность звучания. Размерность музыкального произведения указывается вначале, вслед за ключом, и там же указывается тональность. Значки — ноты — пишут как на линейках, так и между ними.

На рисунке выше приведена таблица всех этих знаков и для примера — запись отрывка хорошо известной песни.

Люди широко пользуются нотами. Но, помимо нот, они придумали и другие замечательные способы записи звуков.

В Москве, в музее Льва Николаевича Толстого, имеется небольшой прибор, который прибыл сюда из Америки. Его прислал в подарок Толстому Томас Эдисон. Это фонограф, или, как называли его тогда, «говорящее письмо».

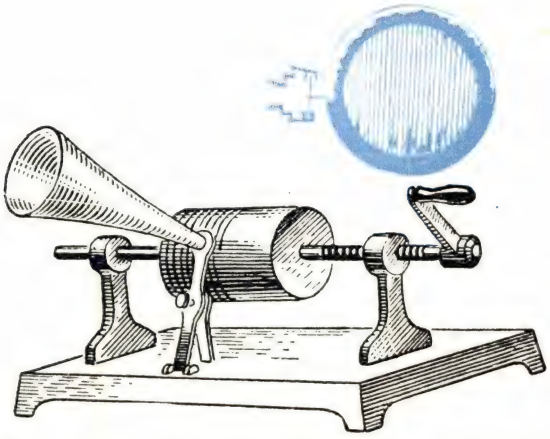
Как устроен этот прибор?

Звук издают тела, колеблющиеся в какой-либо среде, например в воздухе. Если на пути распространения звука поместить тонкую пластинку, то она под действием колебания окружающей среды придет в движение.

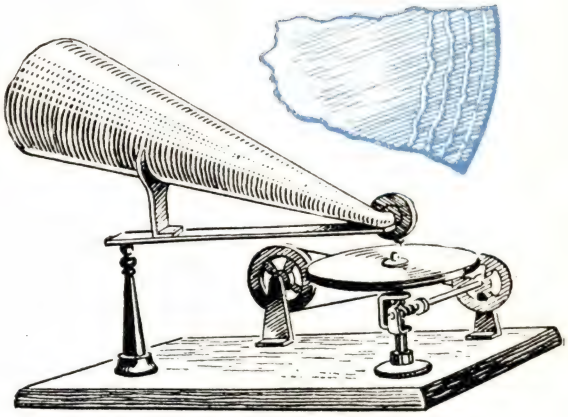
Эдисон укрепил на такой пластинке иглу из сапфира, которая едва касалась специального цилиндра, покрытого листом олова. При вращении цилиндра игла слегка царапала его поверхность. Для того чтобы после одного оборота игла не попадала в проделанную ею борозду, цилиндр при вращении смещался по оси. Поэтому борозда на поверхности цилиндра навивалась спиралью. Когда на пластинку падала звуковая волна, то под действием звука она начинала колебаться и прижимала иглу к поверхности цилиндра с различной силой. Глубина царапины при этом все время менялась.

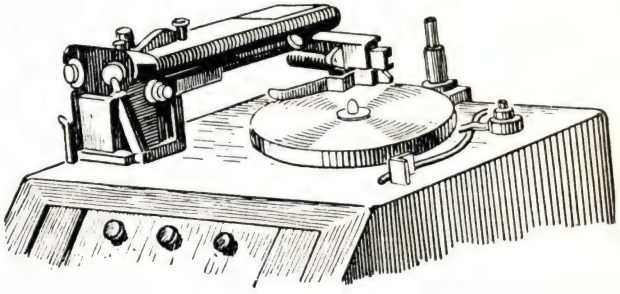
Таким образом Эдисону удалось записать речь в виде царапин на поверхности цилиндра. Для ее воспроизведения достаточно было поместить иглу в начале борозды. При вращении цилиндра она скользила вдоль борозды, все время подпрыгивая и заставляя пластинку совершать колебания. Колеблющаяся же пластинка воспроизводила записанную ранее речь. При дальнейшем усовершенствовании прибора оловянную поверхность цилиндра заменили воском, что значительно удешевило прибор. Некоторое время спустя вращающийся цилиндр был заменен плоской пластиной, на которой борозда наносилась по сворачивающейся спирали.

На приготовленной таким образом восковой пластинке резцом производилась запись. Колебания резца происходили не по глубине борозды, а по ее ширине. Этот прибор был назван граммофоном.



Такой прибор прислал в подарок Льву Николаевичу Толстому Томас Эдисон.





Граммофон имел огромное преимущество перед фонографом Эдисона: записи звуков стало возможным копировать.

В настоящее время звук записывают на дисках, приготовленных из мягкого материала. Затем пластинка копируется на металл, и делаются ее оттиски. Таким образом, можно получить много экземпляров одной и той же звуковой записи.

Записывать звук можно и при помощи света. Для этой цели использовано несколько различных по своей природе явлений.

Прежде всего обратимся к фотографии.

Рассматривая негатив, легко заметить, что между темными и светлыми местами резких границ нет. Плавный переход от света к тени свидетельствует о способности светочувствительной пленки различать слабый и сильный свет. На это обстоятельство и обратили внимание физики, когда решили записать звук при помощи света.

Чтобы осуществить такую запись, необходимо было звуковые колебания превратить в

колебания электрического тока, который питает электрическую лампочку. Для этой цели микрофон включили в цепь лампочки. Затем мигающим светом этой лампы стали освещать движущуюся фотографическую пленку. После обработки на ней оказалась светлая полоса различной прозрачности. Где света попало больше, полоса была темнее, где меньше — светлее. Получился негатив.

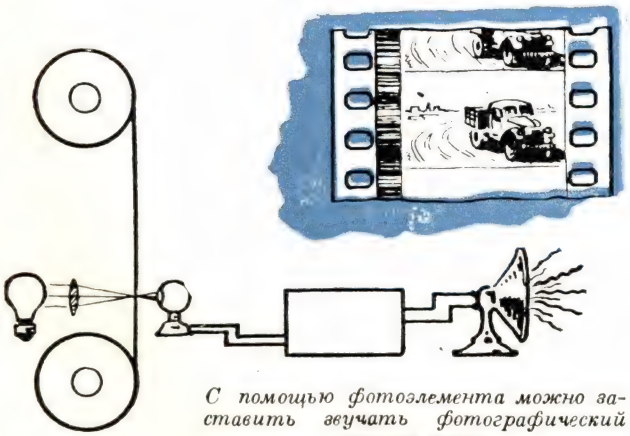
Отпечатав негатив, получили пленку с обратным изображением света и тени. Это и была фотография звука. Чтобы заставить фотографию звучать, стали пропускать через движущуюся пленку узкий пучок света от лампочки постоянной яркости. Так как полоса на пленке была различной прозрачности, то проходящий через нее световой поток светил то ярче, то тусклее. Теперь предстояло мигающий свет превратить в звук.

Для решения этой задачи воспользовались фотоэлектрическим эффектом.

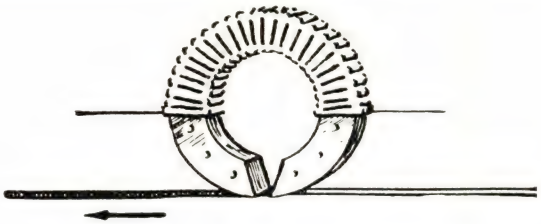
Явление фотоэффекта можно наблюдать при помощи электроскопа, в котором шарик заменен пластинкой. Если зарядить пластинку электроскопа отрицательно и затем осветить ее, то листочки электроскопа постепенно опадут. Под действием света отрицательно заряженная пластинка разряжается.

На основе этого явления был создан прибор, который назвали фотоэлементом. Простейший фотоэлемент представляет собой стеклянный сосуд, внутри которого расположены две пластинки. Одна из них соединяется с отрицательным полюсом электрической батареи и поэтому заряжается отрицательно, другая — с положительным полюсом.

Под действием света из отрицательно заряженной пластинки вырываются электроны,



С помощью фотоэлемента можно заставить звучать фотографический снимок звука.



Лента, покрытая магниточувствительным веществом, намагничивается электромагнитом, по обмотке которого течет ток звуковой частоты.

которые тотчас притягиваются другой, положительно заряженной пластинкой. Таким образом, получается направленное перемещение отрицательных электрических зарядов от одной пластинки к другой — по цепи идет электрический ток. Наличие тока легко установить, если в цепь включить электроизмерительный прибор — гальванометр. Наблюдая за стрелкой гальванометра, можно убедиться, что величина тока в цепи изменяется в зависимости от изменения интенсивности света, падающего на отрицательно заряженную пластинку.

С помощью фотоэлемента можно заставить звучать фотографический снимок звука. Для этой цели узким пучком света просвечивают звуковую дорожку движущейся фотопленки. Прошедший через нее свет будет иметь переменную интенсивность. Создаваемый им фототок будет зависеть от изменения интенсивности света.

После усиления фотоэлектрический ток проходит по обмотке электромагнита, который, притягивая с различной силой мембрану, заставляет ее колебаться, звучать.

Так воспроизводится звук, записанный на фотопленку.

Запись звука при помощи света нашла широкое применение в кино. Звук записывают на киноленте рядом с изображением.

Существует несколько способов записи звука в кино. Но все они основываются на явлении фотоэлектрического эффекта. (Подробнее об этом см. статью «Ожившая фотография» в т. 5 ДЭ.)

Сравнительно недавно удалось получить магнитную запись звука. Для этой цели было использовано явление электромагнитной индукции.

Если на тонкой алюминиевой мембране укрепить легкую проволочную катушку, находящуюся между полюсами постоянного магнита, то движение катушки в магнитном поле будет происходить с частотой колебаний мембраны,

При этом в катушке будет возникать индукционный ток, изменяющийся в соответствии с частотой звука.

Если теперь этот ток подать в обмотку электромагнита, перед которым можно протягивать ленту, покрытую специальным магниточувствительным веществом, то она будет намагничиваться. Намагниченность ленты будет увеличиваться при усилении тока и убывать при его уменьшении. Таким образом, на ленте получим магнитную запись звука.

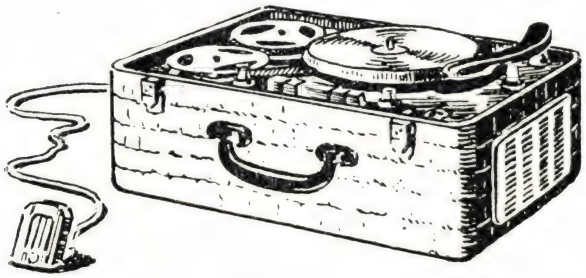
Чтобы воспроизвести такую запись, надо ленту с прежней скоростью протянуть вблизи электромагнита. Произойдет обратный процесс. В обмотке будет возникать ток различной величины. Затем, после усиления, ток пропустят через обмотку другого электромагнита, который заставляет находящуюся рядом с ним мембрану совершать колебания.

Колебания мембраны создадут звуковые колебания воздуха, и звук будет воспроизведен.

Легко заметить преимущество магнитной записи звука перед записью светом. Здесь не требуется какой-либо дополнительной обработки ленты (пленки), на которой записан звук. Когда запись звука сделана с помощью света, фотопленку надо предварительно проявить и отпечатать. Только после этого возможно воспроизведение звука. Звук, записанный на магнитную пленку, может быть тотчас воспроизведен и в случае надобности «стерт».

«Стирается» записанный звук весьма просто. Для этого достаточно магнитную пленку с записью протянуть около электромагнита, по обмотке которого течет быстропеременный ток. Пленка при этом многократно перемагничивается, и благодаря этому исчезают следы записанного на ней звука.

После такого «стирания звука» магнитная пленка пригодна для новой записи, чего нельзя сделать с фотографией звука на фотопленке. После технического усовершенствования магнитного метода записи звука был создан удобный прибор—магнитофон. Магнитофон записывает и воспроизводит звук. Магнитофонная пленка изготовляется из пластмассы. Поверхность пленки покрыта мелкозернистым ферромагнитным порошком.



Магнитофон с устройством для проигрывания пластинок.

Магнитная запись нашла широкое применение в радиопередачах. Многое из того, что нужно передать по радио, удобнее предварительно записать на пленку, чтобы в нужное время воспроизвести.

ПЕРЕДАЧА ЗВУКА НА РАССТОЯНИЕ

Телефон изобрел американский физик Белл. В основу своего изобретения он положил уже известное нам явление электромагнитной индукции. Намотав катушку изолированной проволоки на железный сердечник и поднеся к ней камертон, Белл обнаружил, что в замкнутой катушке возникает переменный ток.

Это происходит потому, что колеблющаяся ножка камертона вызывает изменение магнитного поля сердечника. Затем Белл соединил концы обмотки первой катушки с концами обмотки другой такой же катушки и поместил около сердечника последней второй камертон. Первый камертон возбуждал в первой катушке ток, который, проходя по обмотке второй катушки, намагничивал ее сердечник. Благодаря этому в такт изменениям тока сердечник приводил в движение находящуюся вблизи него ножку второго камертона, т. е. заставлял камертон звучать. Но это были звуки монотонные, схожие с жужжанием.

Как же передать речь? На помощь Беллу пришли опыты немецкого физика Хладни, который изучал колебания пластин. Для того чтобы сделать видимым движение различных участков пластины, он насыпал на ее поверхность песок. Ударяя смычком по краю закрепленной в одной точке пластины и прикасаясь пальцем к другим ее точкам, Хладни наблюдал, как располагаются песчинки. Они собирались в причудливые узоры. Но одному и тому же тону звучания пластины соответствовал один и тот же узор песка на ее поверхности. Повторяя опыты Хладни, Белл заметил, что пластины отзываются и на звук человеческого голоса.

Выбрав пластинки соответствующей толщины, он поместил их вместо камертонов перед электромагнитами. Теперь колебания пластинки под действием звука человеческого голоса превращались в импульсы электрического тока и снова воспроизводились второй пластинкой.

Беллу, таким образом, удалось решить принципиальную задачу передачи звука на расстояние.

Изобретенное Беллом устройство было названо телефоном. Конструкция телефона в то время обладала большими техническими недостатками. Первоначально два лица, соединенные телефоном, могли говорить только по очереди, используя для этого одно и то же устройство — телефон Белла.

Устранил это неудобство микрофон изобретателя Юза. Микрофон Юза представлял собой две угольные чашечки, внутри которых был помещен стерженек из угля. Размер стерженька был таков, что он легко мог дрожать при малейших сотрясениях. Если соединить чашечки с полюсами батареи, величина тока в цепи из-за дрожания стерженька менялась, так как при этом менялось сопротивление цепи (вследствие нарушения контакта). Колебания стерженька возбуждались звуками человеческой речи. Включив микрофон в цепь телефона Белла, можно возбуждать вибрации второй пластины непосредственно меняющимся током. Так была создана телефонная трубка. Со временем угольный стерженек микрофона был заменен угольным порошком, сопротивление которого очень резко меняется в зависимости от изменения акустического давления. В настоящее время существует несколько типов микрофонов, где используются другие физические явления, которые возможно приспособить для тех же целей, т. е. для улавливания звуков и преобразования их в колебания электрического тока.

Спустя четверть века после изобретения телефона немецкий физик Герц получил электромагнитные волны.

Русский физик Александр Степанович Попов использовал электромагнитные волны для передачи звуковых сигналов без проводов.

Возможность передавать речь и музыку заключается в том, что звуковые колебания, превращенные в колебания электрического тока и сложенные с электромагнитными колебаниями высокой частоты, можно излучать в пространство. В приемнике электромагнитные колебания высокой частоты отделяют от электрических

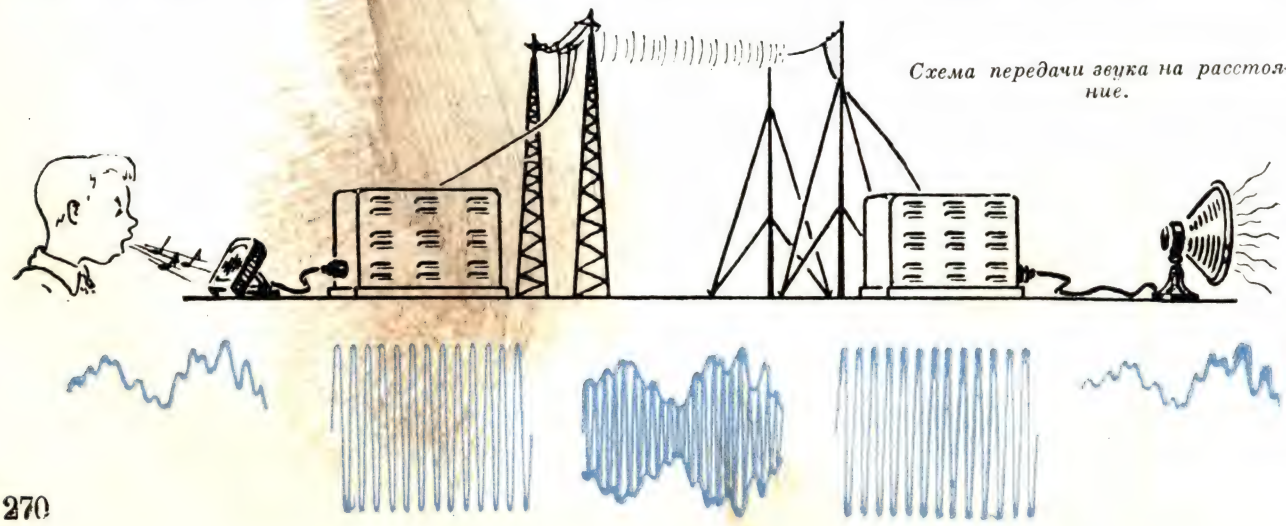


Схема передачи звука на расстояние.

колебаний звуковой частоты. Последние поступают в репродуктор телефона, заставляя пластинку совершать соответствующие колебания и тем самым излучать звук в окружающее пространство. Такова принципиальная сторона проблемы передачи звука по радио.

НЕСЛЫШИМЫЕ «ЗВУКИ»

Неслышимые «звуки» — это упругие волны, частота колебаний которых лежит либо ниже 16 *гц*, либо выше 16—20 тыс. *гц*. Такие частоты не воспринимаются ухом человека.

Если тело колеблется с частотой менее 16 *гц*, оно излучает инфразвук, а если более 20 тыс. *гц* — то ультразвук. Практически использовать неслышимые «звуки» люди научились не так давно. А когда были созданы высокочувствительные приемники звуков самых различных частот, обнаружилось, что эти звуки распространены в природе так же широко, как и слышимые. Выяснилось, что их излучают и воспринимают живые существа на суше, в воздухе и в воде. Теперь известно, что собаки воспринимают ультразвуки с частотой до 100 *кгц*. Этим пользуются дрессировщики для подачи собакам команды, не слышимой людьми.

Установленные в море приемники ультразвука обнаруживают ультразвук при появлении «плавающих островов» планктона. Оказывается, ультразвуковые волны создаются крохотными веслоногими рачками, входящими в состав планктона, когда они трут одну лапку о другую.

В море были обнаружены слышимые звуки музыкальных тонов. Их издают некоторые рыбы. Оказалось, что жаба-рыба, морской петух, рыба-свинка, рыба-квакун, горбыль-пятно и рыба-кошка (названия рыб даны в переводе с латинского) обладают талантами певцов. Эти рыбы водятся в Атлантическом океане и издавна были известны науке как самые обыкновенные немые существа. Физики опровергли это представление. Теперь уже нельзя пользоваться выражением «нем как рыба», когда даешь клятву хранить молчание. Рыбы, оказывается, имеют голос, да еще музыкальный. И если морских певцов соберется много, то, как знать, возможно, они устроят настоящий концерт.

Издает звуки и само море. Частота их меньше 16 *гц*. Это так называемый «голос моря».

Порывистый ветер где-то далеко зарождает шторм, приводит в движение поверхность воды. Сжатия и разрежения морской волны передаются в пространство над поверхностью моря и порождают инфразвуковую волну. Инфразвуковое давление ощущают различные жители моря: медузы, ракообразные существа, живущие в сыром морском песке, морские блохи и гаморусы. Услышав «голос моря», они прячутся в водных глубинах или в прибрежной траве. Еще раньше узнают о приближении шторма морские животные, находящиеся вдали от берега, потому что инфразвук в воде распространяется почти в пять раз быстрее, чем в воздухе,— со скоростью 1500 *м/сек*.

Рыбы, которые живут на очень больших морских глубинах, куда едва проникает свет, пользуются ультразвуком весьма своеобразно. Они излучают ультразвуковые волны, а воспринимают эхо. Это заменяет им при охоте исчезнувшее зрение.

Ультразвук хорошо отражается от воздушного пузыря рыб. Приняв эхо, рыба-охотник плывет в нужном направлении, не упуская «из виду» свою добычу.

Летом в деревне, когда наступают сумерки, можно наблюдать, как мечутся зигзагами летучие мыши, шелестя сухими угловатыми крыльями. Наблюдая стремительный полет летучей мыши, думаешь, что вот-вот она налетит на ствол дерева или стенку сарая. Но каждый раз, встречая на пути препятствие, летучая мышь стремительно взмывает вверх или круто поворачивает в сторону, продолжая головокружительную погоню за крохотными комарами. До глубокой ночи продолжается эта неутомимая, полная риска охота.

Поистине удивительно, как удается летучей мыши с маленькими подслеповатыми глазками

Запись ультразвукового импульса летучей мыши.

заметить во тьме добычу и, не снижая скорости, обойти препятствие.

Кажется, что чудо спасает ее от верной гибели, так безрассудно подвергает она себя все время опасности.

Это обстоятельство привлекло внимание естествоиспытателей. Самые тщательные исследования убедительно доказали, что зрение у летучей мыши весьма слабое. Она почти слепа. Но то, как она ориентируется в сложной обстановке и как отыскивает себе добычу, долгое время оставалось тайной для людей.

ИЗЛУЧАТЕЛИ УЛЬТРАЗВУКА

Частота колебаний воздуха, вызываемая современными излучателями ультразвука, достигает не только десятков тысяч, но и сотен миллионов герц.

Изобретательный ум человека использовал для этой цели давно открытое, но оставленное вначале без внимания явление.

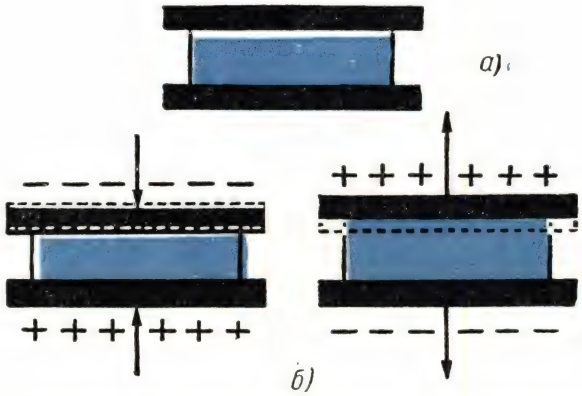
В 1880 г. французскими учеными братьями Пьером и Жоржем Кюри, которые исследовали свойства кристаллов, было замечено, что если кристалл кварца сжать с двух сторон, то на его гранях, перпендикулярных к направлению сжатия, возникнут электрические заряды: на одной грани положительные, на противоположной — отрицательные.

Было обнаружено, что такими свойствами обладают также другие кристаллы — турмалин, сегнетовая соль, цинковая обманка, хлорат натрия и сахар. Выяснилось также, что и при растяжении на гранях кристалла возникают заряды, но уже знаков, противоположных тем, которые возникают при сжатии. Явление возникновения электрических зарядов при сжатии или растяжении кристаллов получило название пьезоэлектричества (от греческого слова «пьезо» — давлю). Кристаллы, которые обнаруживают такие свойства, называют пьезоэлектриками.

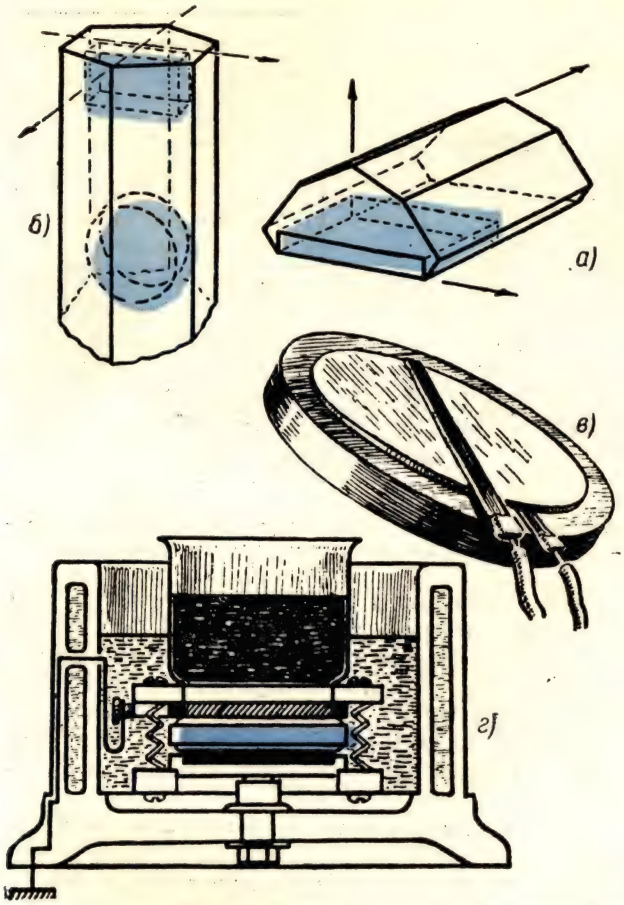
В процессе дальнейших исследований братья Кюри обнаружили, что пьезоэлектрический эффект обратим, т. е. если на гранях кристалла кварца создать разноименные электрические заряды, то кристалл либо сожмется, либо растянется, в зависимости от знаков зарядов на гранях.

Явление пьезоэлектричества получило практическое применение лишь в мировую войну 1914—1918 гг., когда французский ученый Поль Ланжевен воспользовался им для обнаружения подводных лодок.

При движении винт лодки порождает упругие волны. Упругая волна в воде представляет собой чередующиеся сжатия и разрежения, которые распространяются со скоростью более 1500 *м/сек*. При погружении кристалла кварца в воду, в которой распространяется упругая волна, на его гранях появляются электрические заряды. Опыты Ланжевена позволили сконструировать прибор по улавливанию шума от подводных лодок. Затем Ланжевен попробовал заряжать грани кристалла кварца электричеством от генератора переменного тока высокой частоты и установил, что кристалл при этом совершает колебания в такт изменению тока.



а — кварцевая пластинка расположена между электродами; б — при сжатии и растяжении на электродах появляются электрические заряды.



а—для излучателя ультразвука пластинку из кристалла сегнетовой соли вырезали так, чтобы ее грани были перпендикулярны к кристаллографическим осям; б—положение пластинки и кристаллографических осей в кристалле кварца; в — один из видов излучателей с кристаллом сегнетовой соли; г—схема ультразвуковой ванны.

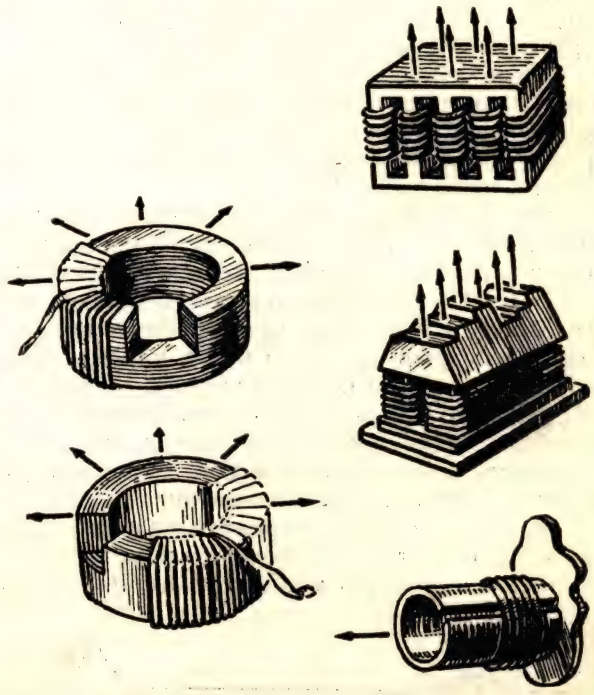
Но отдельная пластинка кварца излучает ультразвук малой мощности. Для того чтобы получить большую мощность колебаний, Ланжевен сделал из маленьких кварцевых пластинок одну большую. Большая кварцевая пластинка, составленная из многих маленьких, была названа м о з а и к о й. Кварцевая мозаика была вложена между двумя стальными листами, которые являлись электродами и одновременно скрепляли ее.

Для того чтобы получить большую амплитуду колебаний, Ланжевен воспользовался явлением резонанса. Была предварительно подсчитана собственная частота колебаний пластинок, а затем приложено переменное напряжение, частота которого равнялась частоте колебаний пластинок кристалла. Исследования Ланжевена заложили основу создания кварцевых излучателей ультразвука различных частот.

Пьезоэлектрическими свойствами обладает также керамика титаната бария. Изготовленные из нее излучатели ультразвука имеют ряд преимуществ перед кварцевыми. Их можно делать различной формы и размеров.

Другой способ получения ультразвука был открыт и исследован тоже не совсем обычно. В 1847 г., изучая магнитные свойства металлов, Джоуль обнаружил, что при перемагничивании электрическим током образцы железа и никеля изменяют свои размеры. Стержень то уменьшается, то увеличивается в такт с изменением направления тока в обмотке. Колеблющийся таким образом стержень способен вызвать колебания окружающей его среды, например воздуха, т. е. породить звук. При токе высокой частоты в среде возникает ультразвук.

Это явление получило название м а г н и т о с т р и к ц и и (от латинского слова «стриктус» — сжатие). Явление магнитострикции тоже обратимо: при быстром сжатии и растяжении сердечника электромагнита, изготовленного из железа или никеля, появляется переменное магнитное поле. В обмотке при этом возникнет электродвижущая сила индукции.



Различные типы магнитострикционных излучателей.

Если обмотка электромагнита замкнута, в ней потечет переменный электрический ток, частота которого совпадет с частотой колебаний стержня.

Итак, для получения ультразвука используются два совершенно различных явления природы: пьезоэлектричество и магнитострикция.

УЛЬТРАЗВУК В ТЕХНИКЕ И НА ПРОИЗВОДСТВЕ

Первые опыты практического применения звука для целей навигации были сделаны в 1837—1839 гг. При определении глубины моря пытались использовать эхо. Результаты опытов были не слишком утешительными. Звук колокола давал очень слабое эхо от дна, еле-еле слышное в общем шуме моря.

После неудачной попытки измерить звуком глубину моря он был использован для решения другой весьма важной задачи.

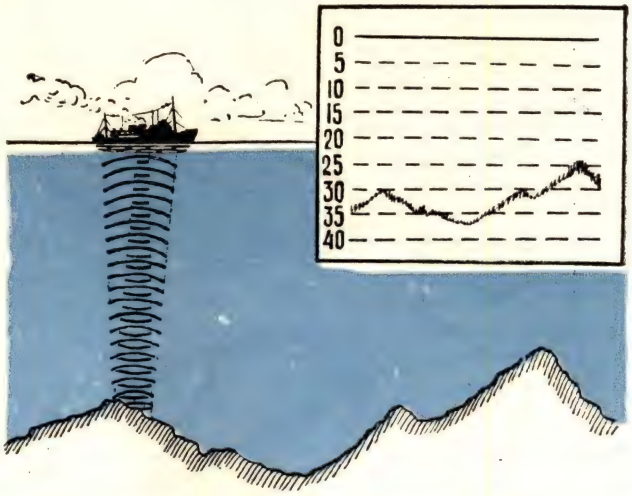
Во время тумана, когда свет маяков плохо виден, очень велика опасность кораблекрушения. Кораблю трудно войти в узкий пролив бухты без световых сигналов маяка. На помощь мореплавателям пришел звук колокола. В центре бухты против пролива располагают под водой колокол. Корабль, направляясь в гавань, опускает по бортам слуховые трубы. Слуховые трубы по бортам корабля напоминают уши.

Но звучание колокола под водой весьма слабое. Значительно более сильный звук издает вращающийся диск с отверстиями, через которые продувают воздух. Это устройство называют с и р е н о й.

После первых попыток использовать эхо для измерения глубины моря к этому способу возвратились лишь спустя несколько десятков лет.

В 1912 г. был сконструирован прибор, пригодный для измерения глубин. Звук разорвавшегося патрона с одного борта корабля после отражения от дна принимался на другом борту. Прибор назвали э х о л о т о м. Максимальная глубина, на которой он действовал, была 150 *м*. А вскоре произошло событие, после которого эхолот нашел другое применение.

В Атлантическом океане в сильный туман корабль-гигант «Титаник» на полном ходу столкнулся с огромным айсбергом, который распорол ему борт. Вода хлынула в отсеки трюма, и корабль затонул в течение нескольких минут. С тех пор для обнаружения препятствий на пути корабля начали пользоваться эхолотом. Его повернули из вертикального положения в горизонтальное, и он стал выполнять роль лоцмана. Теперь его называют г и д р о л о к а т о р о м.

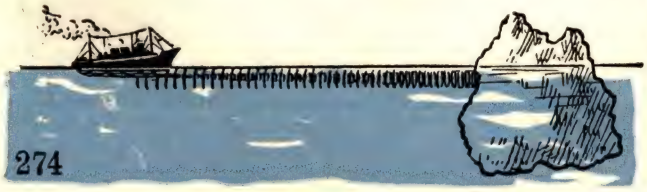


Изображение рельефа дна, полученное с помощью автоматического ультразвукового эхолота.

В настоящее время гидролокацию производят при помощи ультразвуковых волн. Ультразвуковой луч, посланный излучателем, встречая препятствие, отражается, возвращается обратно и принимается звукоприемником. Посылая звук, регистрируют время. Зная скорость его распространения в воде, определяют расстояние до препятствия. Ощупывая звуковым лучом глубины моря, можно не только определить наличие препятствия, но и его форму. С помощью гидролокаторов было найдено много затонувших кораблей.

Усовершенствованный гидролокатор излучает ультразвук не непрерывно, а через определенные промежутки времени. Эхо принимают несколькими приемниками, отстоящими друг от друга на некотором расстоянии. Такой метод позволяет более точно определить расстояние и направление к препятствию.

Широкое применение получил ультразвук в металлургии. Ультразвук хорошо распространяется в металлах. Это навело на мысль использовать «эхо» для определения качества металла. В том случае, если внутри образца есть инородные вкрапления, ультразвуковой луч отражается от них, как от препятствия.



Прибор, при помощи которого обнаруживают теперь дефекты металлов, называется дефектоскопом. Дефектоскопом проверяют готовые изделия, если опасаются, что во время их изготовления внутри появились какие-либо изъяны. Однако дефектоскоп позволяет определить лишь наличие дефекта и расстояние до него от поверхности. Иногда надо знать форму и размер дефекта. Для этого был создан ультразвуковой микроскоп. Устроен он так: ультразвуковой луч «ощупывает» дефект внутри металла, а на специальном экране электронно-лучевой трубки можно видеть изображение дефекта.

В технике используется еще одно свойство звука — так называемый звуковой ветер. Как известно, тело, совершающее колебания высокой частоты и достаточно больших амплитуд, не только заставляет совершать такие же колебания частицы окружающей среды, но и вызывает их движение в сторону распространения волны. Создается постоянный поток, который называют звуковым ветром. При излучении ультразвука в жидкости это явление приводит к интенсивному перемешиванию. Ультразвуковая волна и сопровождающий ее звуковой ветер, достигая свободной поверхности жидкости, заставляют ее фонтанировать.

На дне сосуда с минеральным маслом расположен излучатель ультразвука. Таким излучателем может быть кварцевая пластинка. Посеребренные поверхности пластинки служат обкладками, которые подсоединяют к электрическому генератору высокой частоты.

Благодаря обратимости пьезоэлектрического эффекта пластинка начинает колебаться. Частота ее колебаний совпадает с частотой колебаний, создаваемых генератором. Колебание пластинки передается окружающей ее жидкости, в которой распространяются ультразвуковые волны. Достигая поверхности жидкости, они создают при малых амплитудах зыбь. При достаточно больших амплитудах, когда силы поверхностного натяжения жидкости оказываются меньше сил упругости, образуется фонтан. Высота ультразвукового фонтана может достигать нескольких десятков сантиметров.

Фонтан жидкости, образованный ультразвуком, обладает интересными свойствами. С его помощью можно получать различные эмульсии, т. е. смешивать жидкости, которые в обычных условиях не смешиваются.

Это обстоятельство позволило фармацевтической промышленности воспользоваться ультразвуком для получения лекарств из хорошо раздробленных смесей не растворимых друг в друге жидких веществ. Пищевая промышленность использует это явление для приготовления различных соусов и приправ, например майонеза, маргарина и т. п.

Промышленность, изготовляющая мелкозернистые светочувствительные эмульсии, которые наносят на фотопленку и фотобумагу, также использует ультразвук. Снимки на фотопластинках, эмульсия которых обработана ультразвуком, допускают значительно большее увеличение. При увеличении снимков искажения обусловлены размерами светочувствительных зерен бромистого серебра. Чем мельче зерна (что и достигается при обработке ультразвуком), тем незначительнее искажения при увеличении.

Ультразвук не только способен измельчить не растворимые друг в друге вещества и превратить их в однородную смесь, но способствует и обратному процессу. Если, например, воздух, засоренный копотью, пылью и дымом, подвергнуть действию ультразвука, то происходит объединение большого числа мелких частичек в крупные частички, которые легко оседают. Такой процесс называется к о а г у л я ц и е й.

Ультразвуковой фонтан обжигает помещенный в него палец. Ожог оказывается более значительным, если палец опустить непосредственно в жидкость над кварцевой пластинкой, излучающей ультразвук. Это свойство ультразвука удалось использовать для уничтожения бактерий и микробов, если они содержатся в жидкости. Ультразвуковые методы дезинфекции весьма плодотворны. Ими пользуются для обеззараживания источников воды и водоемов. Ультразвук оказывает гибельное действие и на различного рода личинок, например на личинок малярийных комаров в болотах.

Если семена растений перед посадкой обработаны ультразвуком, то улучшается их произрастание и повышается урожайность. Ультразвуком можно чистить и окрашивать ткани.

Область применения ультразвука в технике значительно расширилась после открытия явления к а в и т а ц и и. Изучение этого явления началось с того, что была обнаружена порча гребных винтов на быстроходных морских судах. После непродолжительного срока службы хорошо отполированные, не поддающиеся ржавлению винты кораблей оказывались покрытыми мелкими щербинками. Складывалось впечатление, что червь разъедает поверхность металла. Такое разрушение его поверхности не может происходить даже при длительном пребывании металла в воде. Аналогичному разрушению подвергались и лопасти гидротурбин. Для того

чтобы устранить это явление, необходимо было найти причину, которая его порождает.

Установить же причину удалось после того, как было обнаружено, что такому же разрушению подвергается металлическая поверхность электродов, нанесенных на кварцевую пластинку, если она излучает мощные ультразвуковые колебания.

Задача оказалась сложной. Надо было разобраться в процессе распространения ультразвуковых волн в жидкости, разобраться в сопровождающих этот процесс явлениях.

Когда создаются мощные упругие колебания жидкости ультразвуковой частоты, то в момент сжатия достигаются очень большие давления. В следующий за сжатием момент разрежения, т. е. растяжения жидкости, из-за больших скоростей движения частиц возникают разрывы жидкости. Разрывы наступают легче всего там, где имеются частицы воздуха или мелкие частички примеси. Образуются пустоты, которые называются кавитационными пузырьками.

Вслед за разрежением вновь наступает сжатие, пузырек захлопывается, а в этом месте развиваются колоссальные давления. Этот-то процесс и называется кавитацией. Если такой процесс протекает вблизи металлической поверхности, то под действием кавитационных импульсов давления происходит разрушение поверхности металла. Кавитационные пузырьки наносят удары подобно молотобойцам. Удар одного пузырька слаб, но таких ударов обрушиваются тысячи, и поверхность металла разрушается.

Явления кавитации удается использовать при обработке твердых хрупких материалов, таких, как стекло, фарфор, драгоценные камни, сверхтвердые сплавы. Оно позволяет чистить очень загрязненные и заржавленные металлические детали. Процесс очистки происходит мгновенно. Тысячи разрывающихся воздушных пузырьков внутри жидкости снимают ржавчину и очищают поверхность металла.

Ультразвук без труда может резать твердые или очень хрупкие тела. При этом не бывает брака, нет излишних отходов материала в опилки.

Особую сложность на производстве представляют фрезерные работы. Ультразвук успешно справляется и с этим процессом. Ценность состоит в том, что исключается сложное вращательное движение фрезы.

Ультразвуковое долото упрощает обрабатывающие машины. Ультразвуковая обработка экономит время на изготовление детали, экономит материал и инструмент и, следовательно, увеличивает производительность труда.

Другое свойство ультразвука позволило ему прочно обосноваться в промышленности строительных материалов — в новой, только что начавшей развиваться отрасли производства железобетонных конструкций.

При помощи ультразвука можно проверить качество бетонных и железобетонных сооружений. Если бетон при кладке был недостаточно уплотнен, внутри него образуются воздушные полости. Вовремя их обнаружить — это значит предотвратить сооружение от преждевременного разрушения. Для этого специальным ультразвуковым дефектоскопом прощупывают бетон и определяют размер раковины, глубину ее залегания.

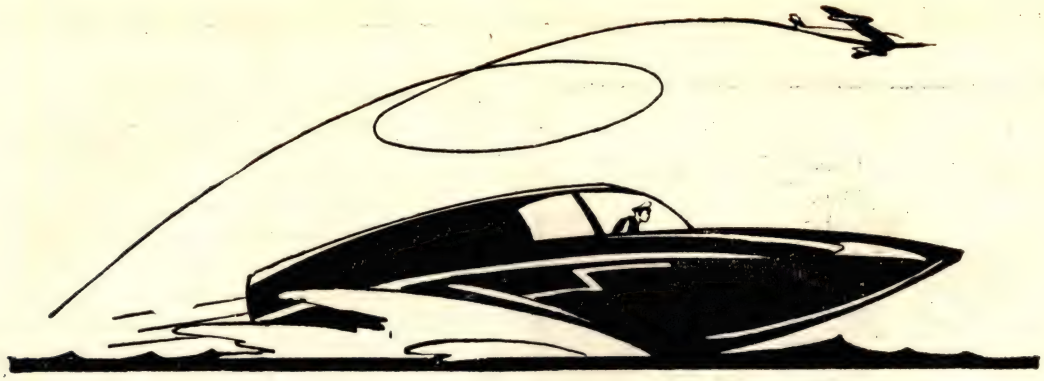
Ультразвук помогает также определять качество бетонных сооружений. Бетон приобретает прочность не сразу. При укладке он жидкий, а затем мало-помалу твердеет, превращаясь в прочный массив,— созревает. Скорость ультразвука в бетоне на разных стадиях созревания различна, поэтому, измеряя скорость распространения ультразвука, можно судить о процессе созревания.

Качество бетона можно считать отличным, если скорость ультразвука в нем превышает 4500 *м/сек*. Если же скорость меньше, чем 2300 *м/сек*, то качество очень плохое.

Широкое развитие строительства гидроэлектростанций, где укладывают сотни тысяч кубометров бетона, требует непрерывного контроля за его качеством, и здесь ультразвук незаменим.

Важную работу выполняет ультразвук в производстве цемента, керамики и асбеста. Прочность этих строительных материалов зависит от того, насколько мелкозерниста их структура. Механический размол строительной массы не дает достаточно мелких частиц. Если же дробить цемент или асбест ультразвуком, частота которого равна 450 тыс. *гц*, то частицы получаются размером в 12 микрон. Такой тонкий размол строительного материала весьма благоприятно сказывается на его качестве.

Приведенные примеры промышленного использования ультразвука далеко не исчерпывают всех его возможностей. С изучением свойств ультразвука круг его практического применения станет еще шире, будет и дальше способствовать техническому прогрессу производства.



Плавание и летание

ПЛАВАНИЕ ТЕЛ

Многие из вас смотрели кинокартину «Гибель «Титаника». Основой для ее сюжета послужило следующее событие: в апреле 1912 г. самый большой в то время океанский пароход «Титаник» на полном ходу столкнулся с плавающей ледяной горой — айсбергом. Корабль затонул, 1490 человек погибло.

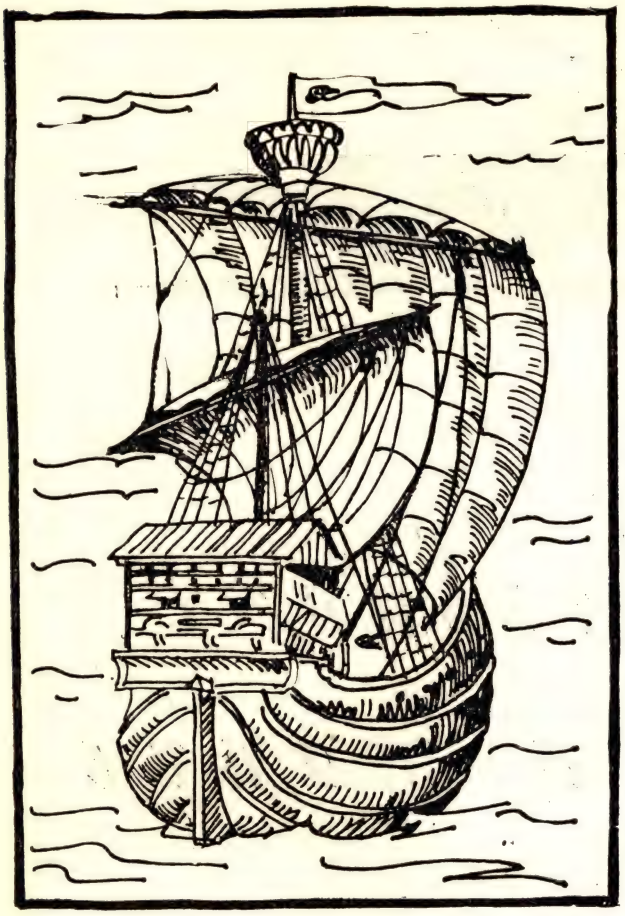
Откуда в океане появляются плавающие ледяные гиганты? Во всяком ли море можно утонуть? Почему не тонут тяжелые стальные корабли — настоящие плавающие города, а монета, брошенная в воду, тонет?

Что такое батисфера? А батискаф? Зачем люди плавали в XX в. через океан на плоту? Как поднять затонувший корабль со дна моря?

Об этом и о многом другом можно узнать из этой статьи.

ТАЙНА ОСТРОВА ПАСХИ. ЛЮДИ НА ПЛОТУ. ТОЛЬКО ДОГАДКИ

На далеком, затерянном в Тихом океане острове Пасхи были обнаружены таблички с надписями на неизвестном языке и колоссальные каменные изваяния людей и богов; вес изваяний измерялся тоннами. Надписей никто не умел прочесть. Было непонятно, как создавались эти каменные исполины, а еще таинственнее было то, что такие же колоссы были об-



Каравелла Колумба «Санта-Мария».

наружены за «тридевять земель» от острова Пасхи — в Южной Америке, в Перу.

Некоторые ученые высказывали предположение об общности происхождения этих фигур. Но если подобные изваяния делали люди одного и того же народа, то как они могли перебраться через океан в те далекие времена?

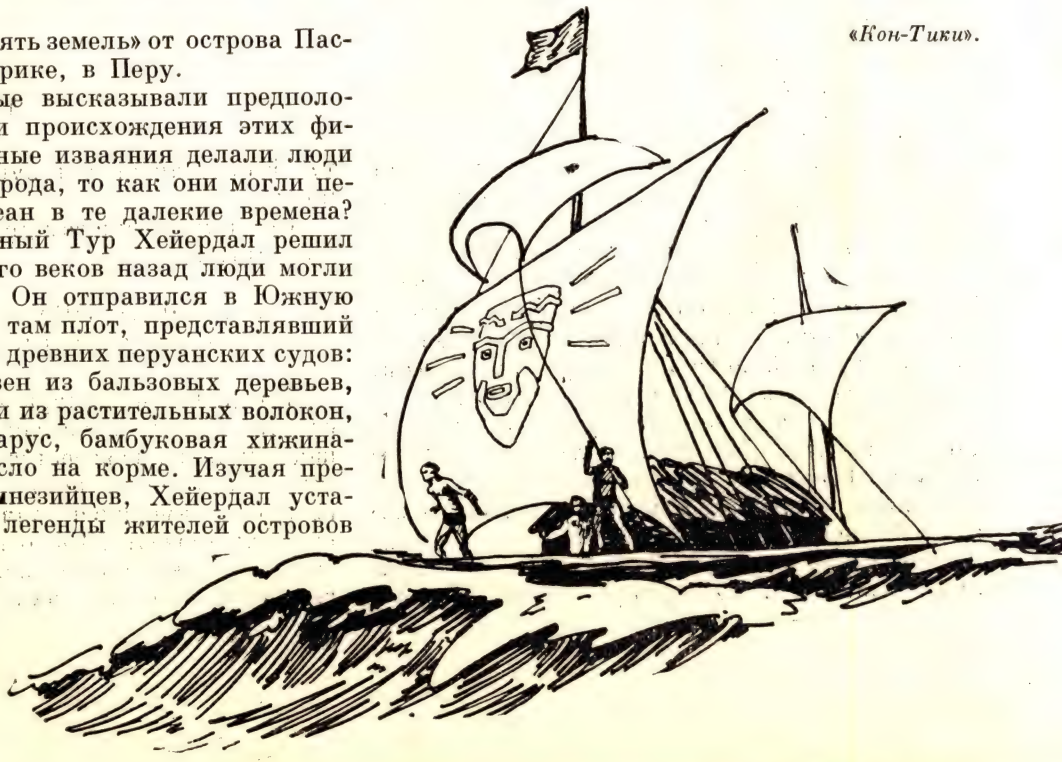
Норвежский ученый Тур Хейердал решил доказать, что и много веков назад люди могли переплывать океан. Он отправился в Южную Америку и построил там плот, представлявший собой точную копию древних перуанских судов: девять толстых бревен из бальзовых деревьев, связанных веревками из растительных волокон, четырехугольный парус, бамбуковая хижина-каюта и рулевое весло на корме. Изучая предания и мифы полинезийцев, Хейердал установил, что многие легенды жителей островов посвящены богу и вождю Кон-Тики, который некогда приплыл через океан с востока. В честь него Хейердал и пять его товарищей назвали свой плот «Кон-Тики».

Более трех месяцев продолжалось путешествие шести отважных исследователей. Около 8000 *км* проплыли они на плоту, доказав высокие мореходные качества древнего перуанского корабля. Об этом подвиге, совершенном во имя науки, Хейердал рассказал в своей увлекательной книге «Путешествие на «Кон-Тики».

Ну а когда люди научились плавать на плотах? Об этом можно только догадываться. Ясно лишь, что к разным народам это умение пришло в разное время. Попытаемся представить себе такую картину.

Всем знакомо стихотворение Некрасова «Дед Мазай и зайцы». Во время наводнения зайчишки инстинктивно вскакивали на плывущие мимо них деревья. Вероятно, и люди, попав в наводнение, старались ухватиться за что-нибудь, уже плывущее по воде. Постепенно они поняли, что дерево может помочь преодолевать водные преграды. Деревья могли случайно сцепиться ветвями, а человек мог заметить, что на двух стволах легче плыть, чем на одном. Может быть, так и родилась идея плота.

А где-то в другом месте Земли, где росли большие и толстые деревья, человек научился плавать на дереве верхом, оседлав его, как коня. Дупло, в котором можно было удобно сидеть, не замочив ног, возможно, послужило прообразом долбленой лодки.



«Кон-Тики».

КАК ЖИДКОСТИ ВСТРЕЧАЮТ «ГОСТЕЙ»

Погрузим в сосуд с водой кусок пробки или дерева. Стоит только отнять руку, как вода вытолкнет их на поверхность. Но так будет не со всеми телами. Есть выражение: «Пошел камнем на дно». Действительно, камень или обычный металлический ключ сразу пойдет на дно. Правда, жидкость выталкивает вверх и тела, которые в ней тонут, да только ей это не удается: не хватает у жидкости силы, чтобы их вытолкнуть.

Привяжем к металлической ложке тонкую резиновую нить так, чтобы ложка была расположена горизонтально, как показано на рис. 1 справа, и измерим длину резинки. Затем опустим нашу ложку, подвешенную на резинке, в сосуд с водой. Измерив линейкой длину резинки в этом положении, мы убедимся, что вода выталкивает ложку вверх — нить стала короче.

Силу, которая выталкивает тело из жидкости, называют в ы т а л к и в а ю щ е й. И еще одно удачное название придумали люди для этой силы — п о д д е р ж и в а ю щ а я.

Пробка плавает на поверхности сосуда с водой, словно ее кто-то поддерживает. Короче стала в воде резинка, на которой висит ложка, как будто кто-то невидимый выталкивает ложку снизу. Оба эти названия: «выталкивающая сила» или «поддерживающая сила» — совершенно равноправны и означают одно и то же.

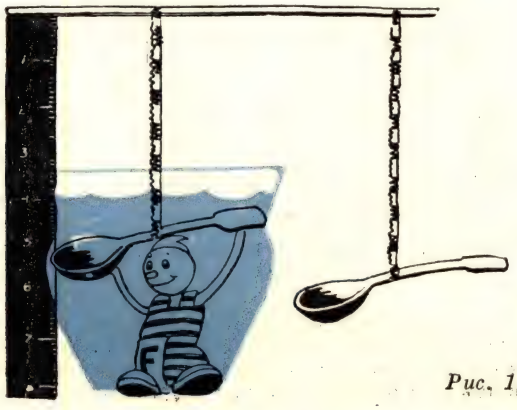


Рис. 1.

А теперь несколько вопросов на соображение. Есть такая гимнастическая фигура «преднос», когда, опираясь на руки, держат вытянутые ноги под прямым углом к туловищу. Почему преднос легко сделать в воде?

Почему больно лежать на морской гальке на берегу, а не больно лежать на таких же камешках, погрузившись в море? Почему тяжесть ведра с водой мы начинаем ощущать только с того момента, когда ведро показывается над поверхностью воды в колодце? Попробуйте ответить на эти вопросы самостоятельно.

Куда же направлена выталкивающая сила? Можно легко догадаться, что эта сила направлена в е р т и к а л ь н о в в е р х. Ведь резиновая нить, к которой подвешена ложка в воде, укорачиваясь, сохраняет свое отвесное положение и не отклоняется куда-либо в сторону.

Рис. 2.

Привяжем короткой ниткой к пробке такой груз, чтобы он затащил ее под воду. Отвесно натянутая нить показывает (рис. 2), что выталкивающая сила, которая действует на пробку, направлена вертикально вверх.

ПОПРОБУЕМ ТАНЦЕВАТЬ НЕ ОТ ПЕЧКИ. ВОСПОМИНАНИЯ, КОТОРЫЕ НЕ У ВСЕХ ЕСТЬ. РИСУНКИ-ПОМОЩНИКИ

Всем знакомо выражение «танцевать от печки». Теперь оно употребляется только в переносном смысле и означает: начинать какое-либо дело с самого начала. Чтобы не затянуть наш рассказ, мы не будем все время «танцевать от печки». Воспользуемся уже известными фактами. Вспомним, что жидкость давит во все стороны — и снизу вверх, и сверху вниз, и слева направо, и справа налево, и по любому другому направлению, что давление внутри жидкости равно ее удельному весу, умноженному на высоту столба жидкости.

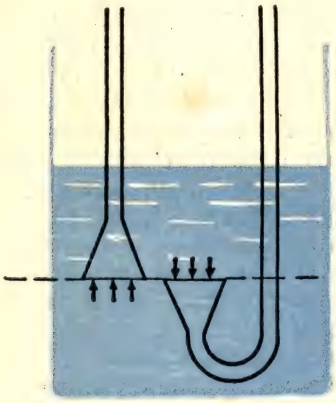


Рис. 3. Приборы, измеряющие давление, называются манометрами. Два манометра, мембраны которых расположены так, как это показано на рисунке (для простоты сами манометры не нарисованы), покажут одно и то же давление. Это означает, что жидкости давят как сверху вниз, так и снизу вверх и что давление на одной и той же глубине одинаково. Направление давления жидкости на мембраны показано стрелками.

Из этого следует, что в любой жидкости давление на одной и той же глубине одинаковое (рис. 3 и 4), а чем глубже, тем оно больше.

Тот, кто глубоко ныряет, чувствует боль в ушах от давления воды на барабанную перепонку. Ученые проделали такой опыт: поместили внутрь металлической клетки кусок дерева, а клетку на прочном тросе опустили глубоко в море. Когда ее вынули, оказалось, что колоссальное давление воды так сильно сжало кусок дерева, что он, потеряв плавучесть, тонул в воде.

На рис. 5 показан опыт Паскаля. В днище прочной деревянной бочки он сделал узкое отверстие и вставил туда длинную трубку, через которую вливал воду. Когда бочка и трубка заполнились, давление воды разорвало бочку.

Посмотрим на рис. 6. Давление жидкости равно ее удельному весу, умноженному на высоту столба. Это значит, что давление на уровне дна во всех сосудах одинаково, если в них налита одна и та же жидкость до одинаковой высоты. Сразу и не верится. В этом и заключается гидростатический парадокс[1].

Рис. 5. Опыт Паскаля.

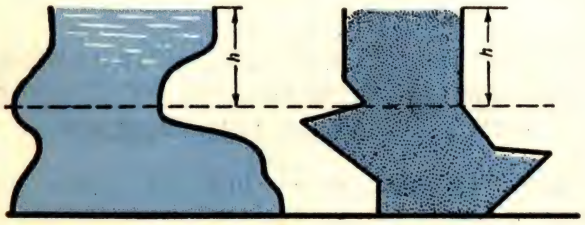


Рис. 4. Слева сосуд с водой, справа — с ртутью. На какой-нибудь глубине h давление внутри сосуда с водой везде одинаково. Давление ртути на этой глубине также будет одинаково, но оно будет в 13,6 раза больше, чем давление воды на этой глубине, так как удельный вес ртути 13,6 $\frac{Г}{см^3}$, а воды 1 $\frac{Г}{см^3}$. Показано также, что высоту столба жидкости следует всегда отсчитывать от ее свободной поверхности. Форма сосуда роли не играет.

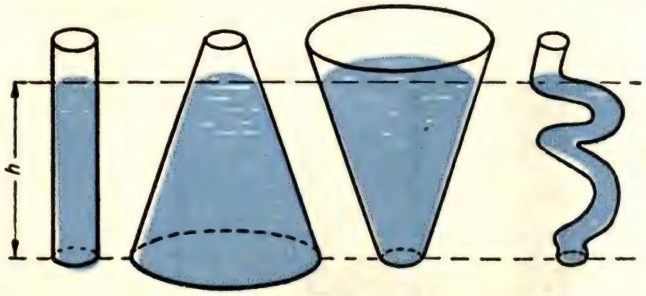


Рис. 6. Удивительные сосуды. Гидростатический парадокс.

[1] Парадоксом мы называем какое-либо утверждение, расходящееся с общепринятым мнением, или такое, которое на первый взгляд кажется удивительным и нелепым, но оказывается справедливым.

С ПОМОЩЬЮ ЗНАМЕНИТОГО ГОЛЛАНДЦА ПОБЕЖДАЕМ ВЫСШУЮ МАТЕМАТИКУ. УМНЫЙ ЛОДОЧНИК

В жидкость помещены куб, цилиндр и параллелепипед, расположенные, как показано на рис. 7. Будем говорить пока только о цилиндре. Давление на одной и той же глубине одинаково, поэтому силы давления, действующие на боковые стенки цилиндра, уравновешиваются. Но сила давления, действующая на верхнее основание цилиндра, будет меньше силы давления, действующей на его нижнее основание, потому что они расположены на разной глубине (рис. 8), а ведь чем глубже, тем давление в жидкости больше. Значит, равнодействующая всех сил, действующих со стороны жидкости на цилиндр, будет направлена вертикально вверх. Это и есть выталкивающая сила.

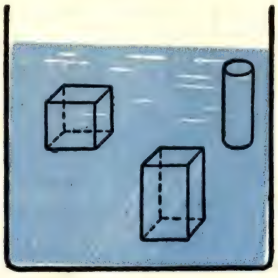


Рис. 7.

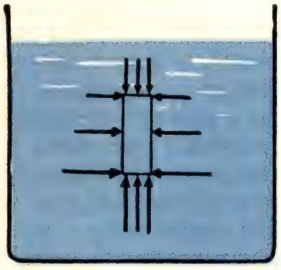


Рис. 8. Действие сил на цилиндр.

Для куба и параллелепипеда будут справедливы точно такие же рассуждения.

Нам известно, отчего возникает выталкивающая сила. Для таких простых случаев ее нетрудно было бы и рассчитать. На рис. 9 показаны те же самые тела *A*, *B* и *C*, что и на рис. 7, но расположены они наклонно. Попробуем теперь доказать, что на эти тела действует выталкивающая сила, и рассчитать ее. Вряд ли нам это удастся! Ну, а если тело *D* имеет какую-то неправильную форму? Оказывается, и здесь можно рассчитать выталкивающую силу, но для этого уже надо знать высшую математику.

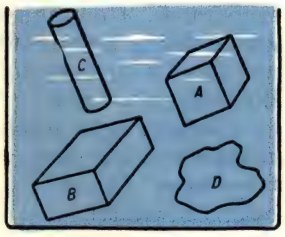


Рис. 9.

А может быть, можно найти более легкий и короткий путь? Выберем в проводники знаменитого голландского математика и физика Стевина. В конце XVI в. вышла его книга, в которой дан замечательно простой и наглядный прием для определения выталкивающей силы. Позже этот прием, правда несколько видоизмененный, стал называться «принципом отвердевания».

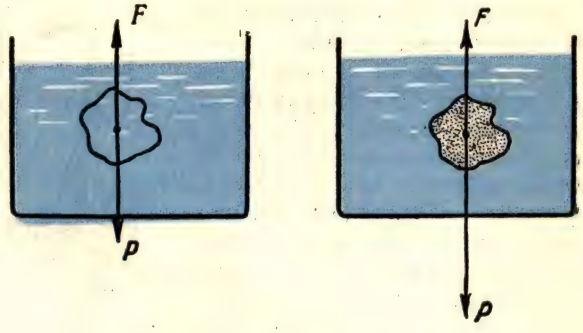


Рис. 10.

Пусть в сосуд налита жидкость. Представим себе, что часть ее затвердела, но вес этой части остался неизменным. Очевидно, равновесие в сосуде не нарушилось. Но равновесие возможно лишь тогда, когда направленная вверх выталкивающая сила будет равна весу рассматриваемой части жидкости.

Мысленно удалим затвердевший объем жидкости и вставим на его место твердое тело точно такого же объема и формы (рис. 10). Жидкость будет «обманута». Ведь для нее ничего не изменилось, и она будет давить на это тело с такой же силой, как раньше давила на жидкость.

Итак, если тело полностью погружено в жидкость, то на него действует вертикально вверх выталкивающая сила, равная весу жидкости в объеме тела.

На рис. 11 показано, что на тело, частично погруженное в жидкость, будет действовать выталкивающая сила, равная весу жидкости в объеме погруженной части тела.

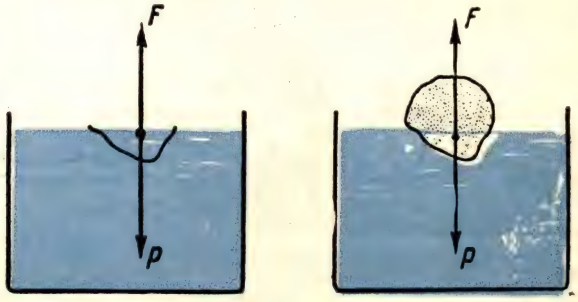


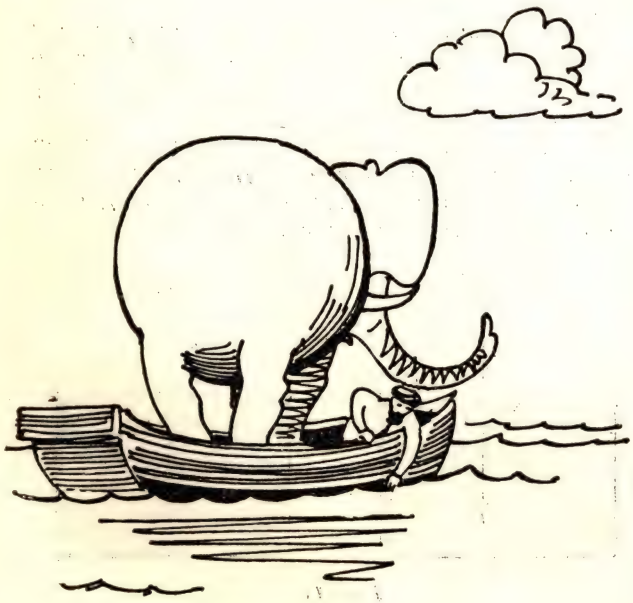
Рис. 11.

Обычно эти формулировки объединяют в одну.

В наше время закон, который впервые был открыт Архимедом, читается так: *На тело, частично или полностью погруженное в жидкость, действует вертикально вверх выталкивающая сила, равная весу жидкости, вытесненной телом.* Интересно, что справедливость закона Архимеда для газов была понята значительно позже — через много столетий.

Таким образом, стало ясно, что выталкивающая сила не зависит ни от наклона тела, ни от его формы.

В старой восточной сказке рассказывается: «Царь обещал дать тому, кто взвесит его слона, столько золота, сколько весит сам слон. Бедняк-перевозчик поместил слона в свою большую лодку и отметил тот уровень, до которого она погрузилась в воду. Затем, сведя слона на берег, он нагрузил лодку золотом до прежней отметки. Вес золота равнялся весу слона». Неграмотный лодочник, конечно, не знал закона Архимеда. Он только сообразил, что если два груза имеют одинаковый вес, то они будут погружать лодку в воду до одного и того же уровня.



ПЕШЕХОДНЫЕ ДОРОЖКИ И ЛЕГЕНДАРНЫЕ РАССКАЗЫ. АРХИМЕД И ЕГО ОТКРЫТИЕ

В некоторых странах у пешеходных дорожек стоят щиты, на которых нарисованы скачущий заяц и ползущая черепаха. Надписей нет никаких, но щиты кратко и образно напоминают пешеходам, что одинаково опасно бежать через дорогу быстро, как заяц, или ползти медленно, как черепаха.

Похожую роль в сознании людей играют легендарные рассказы об исторических личностях и о великих ученых. Часто эти рассказы называют историческими анекдотами. Пусть они и не всегда в точности соответствуют фактам, но зато очень интересны, поучительны и настолько красочны, что запоминаются на всю жизнь. Архимеду в одном из таких рассказов приписывается гордое изречение: «Дайте мне точку опоры, и я сдвину Землю». Эти слова знает теперь каждый школьник. Они напоминают нам о человеке, открывшем законы рычага.

Деятельность Архимеда была очень разносторонней. Популярность его среди современников была настолько велика, что послужила поводом к возникновению множества легенд. Вот одна из них.

Гиерон, став царем Сиракуз, решил в благодарность за свои успехи принести в дар бессмертным богам золотую корону. Он заказал ее мастеру и приказал отвесить ему нужное количество золота. Тот к назначенному сроку приготовил корону, и, казалось, вес ее точно соответствовал весу отпущенного золота. Но царю донесли, что вместо части золота мастер примешал такое же количество серебра. Гиерон разгневался, но не мог найти способа уличить мастера в нечестности. Он обратился за помощью к Архимеду.

Как рассказывают, Архимед сделал два слитка — один из золота, другой из серебра — каждый такого же веса, какого была корона. Затем наполнил водой сосуд до самых краев, опустил в него серебряный слиток и отметил, сколько воды он вытеснил. При этом ему удалось установить, что вес серебряного слитка соответствует вполне определенному объему воды.

Повторив опыт со слитком золота, Архимед увидел, насколько меньший объем он занимает по сравнению с объемом равного ему по весу слитка серебра. Затем, опустив в сосуд корону, нашел, что воды вытекло больше, чем при погружении золотого слитка. А ведь вес каждого слитка был равен весу короны! Пользуясь открытым им законом, Архимед рассчитал, сколько золота и сколько серебра пошло на изготовление короны. Таким образом была обнаружена примесь серебра, а следовательно, и недобросовестность мастера.

Два обстоятельства важны в этой легенде. Во-первых, Архимед нашел способ для измерения объемов твердых тел сложной формы. Во-вторых, чтобы рассчитать примесь серебра в золоте, ему пришлось применить понятие удельного веса. Это само по себе было уже большим открытием.

Для того чтобы рассказать о законе плавания, открытом Архимедом, приведем отрывок из его работы, использовав для облегчения чертежи.

На рис. 12 изображен какой-то объем жидкости V_1 с весом A (тело *1*). Возьмем такой же объем металла. Он тяжелее жидкости, пусть его вес будет $A+B$ (тело *2*). Жидкость с таким же весом $A+B$ займет какой-то объем V_2 — больший, чем V_1 (тело *3*). И, наконец, представим себе, что подобран такой материал легче жидкости, объем которого V_2, а вес A (тело *4*).

Составим из тел *1* и *3* новое тело *5*. Объем его будет V_1+V_2, а вес $A+A+B=2A+B$. Из тел *2* и *4* составим тело *6*; объем его V_1+V_2, а вес $A+A+B=2A+B$.

Мы примем два утверждения Архимеда без доказательства и, основываясь на них, выведем третье его утверждение.

Разберем первое утверждение Архимеда: *Тела, имеющие при равном объеме равный с жидкостью вес, будут плавать, полностью погрузившись в жидкость.*

Объемы и веса у тел *5* и *6* одинаковы. Тело *5* целиком состоит из жидкости; значит, тело *6* будет плавать в этой жидкости.

Второе утверждение: *Твердые тела, более легкие, чем жидкость, при погружении в жидкость стремятся кверху с силой, равной разности между весом жидкости, взятой в объеме этих тел, и весом самих тел.*

Рассмотрим тела *3* и *4*. Тело *4* легче жидкости, и равный ему объем жидкости *3* весит на B больше. Это значит, что если тело *4* погрузить в жидкость, то оно будет стремиться кверху с силой B.

Доказав справедливость двух предыдущих утверждений, Архимед смог на основании их доказать и справедливость третьего: *Тела, тяжелее жидкости, опущенные в нее, погружаются все глубже, пока не достигнут дна. Пребывая в жидкости, они теряют в своем весе столько, сколько весит жидкость, взятая в объеме этих тел.*

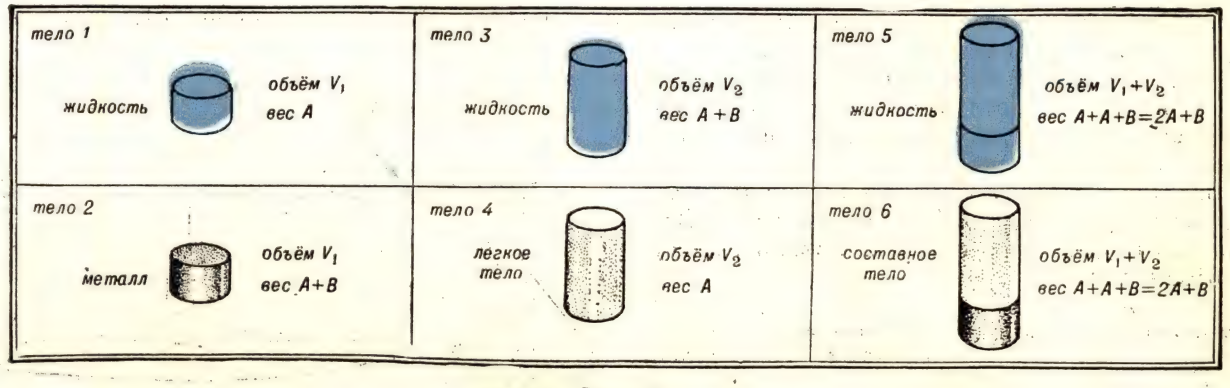


Рис. 12.

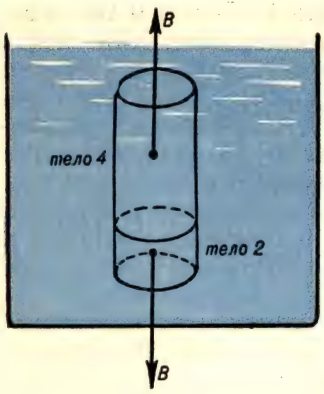


Рис. 13.

Вернемся к составному телу *6* (рис. 12). Если на одну его часть — тело *4* — действует вверх сила *B* и (как мы уже говорили) все тело плавает в жидкости, то это означает, что на другую его часть — тело *2* — действует тоже сила *B*, но направленная вниз (рис. 13). Следовательно, тело *2*, вес которого в воздухе $A + B$ в жидкости тянет вниз с силой *B*, т. е. его потеря в весе равна *A*. Это как раз столько, сколько весит жидкость в его объеме (сравним тела *1* и *2*). Ясно, что предоставленное самому себе тело *2* будет тонуть.

Работы Архимеда отличает простота и доступность для понимания. Многие выведенные им законы легли в основу современной науки.

Прекрасна и поучительна его биография. Блестящее образование и живой ум сочетались в нем с настойчивостью и трудолюбием. Вся его научная деятельность была связана с жизненными потребностями. Поражает разносторонность его трудов в различных областях знания: в астрономии, физике, математике, механике, инженерном деле.

Недаром легенды, овеявшие славой его имя, дошли до наших дней.

СРЕДНИЙ УДЕЛЬНЫЙ ВЕС. ПОДВОДНАЯ ЛОДКА. АВТОНОМНЫЙ ВОДОЛАЗ

Дан самый разнородный набор предметов, например: человек, радиоприемник и книга. Можно ли как-то «усреднить» их вес? На первый взгляд такая задача кажется нелепой.

Представим себе тело, полностью погруженное в жидкость. Для удобства рассуждений напишем рядом формулы выталкивающей силы и веса тела.

Выталкивающая сила равна удельному весу жидкости, умноженному на объем тела. Вес тела равен удельному весу тела, умноженному на объем тела:

$$\underset{\text{(выталкивающая сила)}}{F} = \underset{\text{(удельный вес жидкости)}}{d_ж} \times \underset{\text{(объем тела)}}{V};$$

$$\underset{\text{(вес тела)}}{P} = \underset{\text{(удельный вес тела)}}{d_т} \times \underset{\text{(объем тела)}}{V}.$$

Из сравнения этих формул видно, что если удельный вес тела равен удельному весу жидкости, то тело будет плавать в ней на той глубине, на которой мы его поместим. Если удельный вес тела меньше удельного веса жидкости, то тело всплывет на поверхность. По мере того как оно будет всплывать, объем его погруженной части (а значит, и выталкивающая сила) будет уменьшаться. Тело будет плавать на поверхности жидкости начиная с того момента, когда выталкивающая сила станет равной его весу. А если удельный вес тела больше удельного веса жидкости, то тело пойдет ко дну.

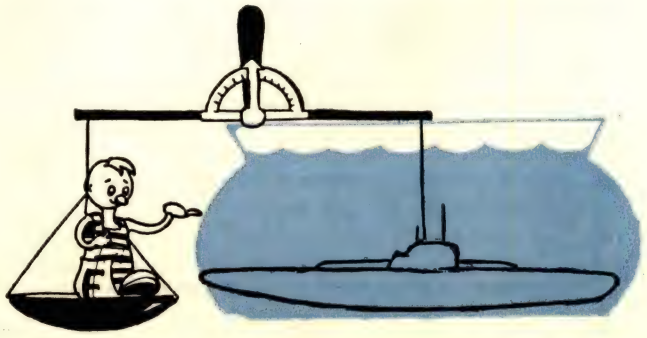
Остановимся более подробно на последнем случае: удельный вес железа 7,8, а воды — 1. Таким образом, мы доказали, что железо никогда не будет плавать в воде. Ну а как же тогда плавают корабли и подводные лодки, сделанные из металла?

Теперь вдумаемся в наше доказательство. Ведь понятие удельного веса мы применяем только для сплошных и однородных тел. Значит, наш вывод правилен и означает, что сплошной кусок железа никогда не будет плавать в воде. Мысленно образуем внутри железного шара полость. Разделим вес такого шара на его объем и найденную величину назовем средним удельным весом этого тела. Формула среднего удельного веса совершенно аналогична формуле удельного веса:

$$d\,(\text{удельный вес}) = \frac{P\,(\text{вес сплошного и однородного тела})}{V\,(\text{объем этого тела})},$$

$$d_{ср}(\text{средний удельный вес}) = \frac{P\,(\text{вес неоднородного тела с полостью})}{V\,(\text{объем этого тела})}.$$

Точно так же, как плавание сплошных тел определяется их удельным весом, плавание несплошных тел будет определяться их средним удельным весом. Подводная лодка будет плавать на определенной глубине, не



Гонки подводного скутера и морской черепахи.

опускаясь и не поднимаясь, если ее средний удельный вес будет равен удельному весу морской воды.

Чтобы получить средний удельный вес лодки, нужно сложить вес ее корпуса с весом всего, что в ней находится (людей, двигателей, аккумуляторов и т. д.), и разделить полученную сумму на объем лодки. Теперь понятно, что задача об «усреднении веса» человека, радиоприемника и книги имеет смысл.

В то время как удельный вес — величина постоянная, средний удельный вес может изменяться. Это — глубокое и принципиальное различие. Набрав в балластные цистерны воды, подводная лодка будет погружаться в глубину моря. Ее средний удельный вес теперь больше удельного веса морской воды. Выгнав сжатым воздухом воду из балластных цистерн, подводная лодка начнет всплывать. Обратите внимание, что подводная лодка сохраняет свой объем неизменным и добивается изменения среднего удельного веса, меняя свой общий вес.

Заметим, что она не могла бы плавать без так называемых горизонтальных рулей: даже самая незначительная разница между весом и выталкивающей силой гнала бы ее или на дно, или на поверхность.

По-иному меняет свой средний удельный вес «автономный» водолаз. Обычно водолаз получает воздух с поверхности по резиновому шлангу. А одетый в скафандр автономный водолаз носит запас сжатого воздуха с собой в специальных баллонах. Для того чтобы подняться на поверхность, он увеличивает свой объем, впуская в скафандр избыточное количество воздуха.

«ПОТОЛОК» И ДНО ОКЕАНА. «ПОДВОДНЫЕ ЛЕГКИЕ» И СТАЛЬНЫЕ СКОРЛУПЫ

По современным исследованиям наибольшая глубина в океане равна примерно 11 *км*. Подводные же лодки на глубину более 250 *м* опускаться не могут, так как их корпус не выдерживает большего давления воды. Ведь на такой глубине на каждый квадратный сантиметр поверхности действует сила примерно в 25 *кГ*. Образно говоря, подводная лодка движется только по «потолку» океана.

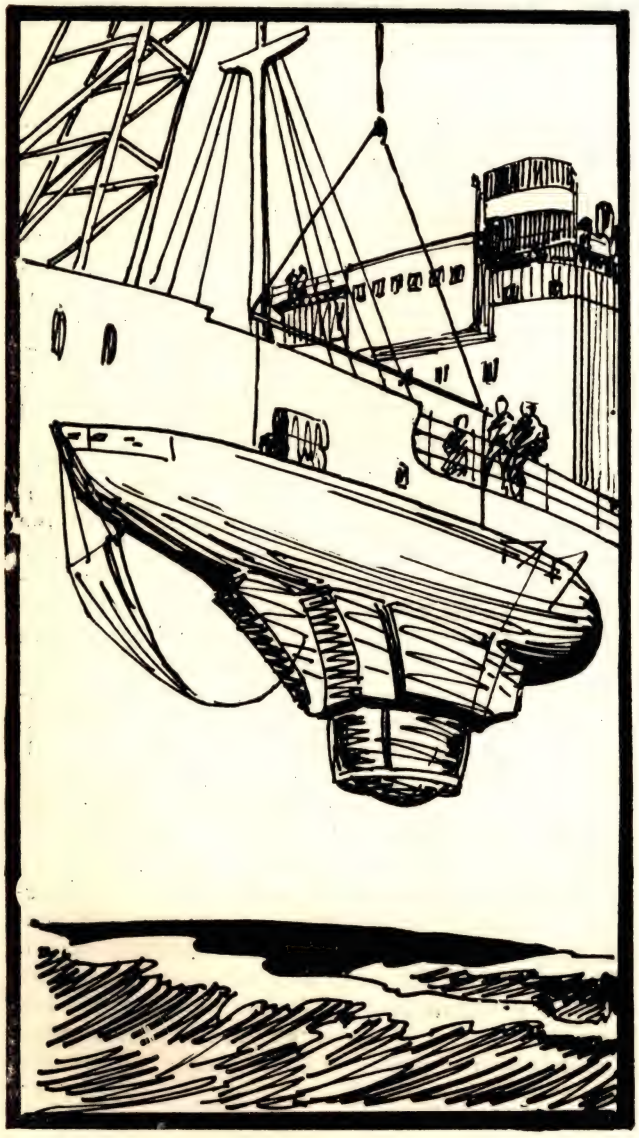
Еще в худшем положении находится водолаз. Если его скафандр сделан из мягкой водонепроницаемой ткани, то внешнее давление воды передается на самого водолаза. И больше чем на глубину около 150 *м* в нем опускаться нельзя. Поэтому был создан жесткий скафандр. Он представляет собой как бы прочный футляр и защищает от давления воды. Водолаз внешне напоминает закованного в латы средневекового рыцаря. В таких скафандрах можно опускаться глубже (до 250 *м*), чем в мягких, но широкого распространения они не получили, потому что неудобны для работы под водой. Их используют главным образом для подводных наблюдений.

В фантастическом романе В. Беляева «Человек-амфибия», написанном в 30-х годах, ребенку сделали операцию, после которой он мог дышать не только легкими, но и жабрами. На глазах у человека-амфибии были большие выпуклые очки, а одежда его состояла из сверкающей чешуи. Это была фантазия писателя.

Но на наших глазах она превращается в быль. За последнее десятилетие большое

развитие получило подводное плавание. Люди часами плавают под водой, изучая жизнь моря и его обитателей. На ногах у них резиновые ласты, глаза и нос закрыты водонепроницаемой полумаской, а во рту мундштук, соединенный с находящимися за спиной баллонами сжатого воздуха — а к в а л а н г о м. В переводе на русский язык «акваланг» — подводные легкие.

Вооруженные аквалангами люди спускаются под воду не только для исследования растительной и животной жизни океана, но также для подъема затонувших грузов и археологических работ. Плавание под водой и подводная охота стали новым видом спорта.



Батискаф, готовый к погружению.

Один из родоначальников подводного плавания француз Ив Кусто́ сконструировал даже подводный скутер, который может тянуть человека под водой со скоростью 10 *км/час.* (см. рис. на стр. 285). Он даже может буксировать несколько человек, но скорость его при этом значительно снижается.

С освоением подводного плавания интенсивно продвинулось вперед изучение «потолка» океана. Но человек не отказался от мысли обследовать и его дно. Впервые глубоко в океан он проник в прочном металлическом цилиндре. В дальнейшем для глубокоподводных исследований начали применять стальные шары с иллюминаторами из толстого кварцевого стекла — б а т и с ф е р ы.

В 1934 г. американским ученым Вильяму Бибу и Отису Бартону удалось опуститься в батисфере на глубину около 1 *км.* Во время спуска они обнаружили новые виды рыб.

С помощью батисфер были проведены многие интересные исследования. Однако эти аппараты имели большой недостаток: они были связаны тросом с кораблем. Трос позволял батисфере передвигаться только по вертикали, а обрыв его означал неминуемую гибель.

Изучением морских глубин увлекся знаменитый исследователь стратосферы бельгийский профессор Пикар. Он решил не только подняться выше всех вверх, но и опуститься глубже всех в океан. Пикар сконструировал для погружения на большие глубины б а т и с к а ф.

Исследователи и приборы размещаются в стальной, имеющей форму шара гондоле, которая укреплена под наполненным бензином металлическим продолговатым «поплавком». Удельный вес бензина 0,8 *Г/см*^{3}, поэтому оснащенный таким поплавком подводный корабль обладает большим запасом плавучести. Для погружения использовался балласт из находящихся в специальной камере стальных дробинок. Они удерживаются электромагнитом и могут быть сразу выброшены в случае опасности.

30 сентября 1953 г. батискаф, в котором находились Пикар с сыном, достиг глубины 3150 *м.* Исследователи пробыли под водой 2 часа 20 минут и непрерывно вели киносъемки. На случай встречи с невиданными морскими чудовищами батискаф был снабжен даже глубоководной пушкой.

В другом батискафе, построенном во Франции по проекту инженера Вильяма, 15 февраля 1954 г. Гуо и Вильям установили новый рекорд погружения, опустившись на глубину 4050 *м*.

Сейчас усовершенствованные батискафы оснащены двигателями и винтами и могут уже самостоятельно передвигаться в любом направлении. Несомненно, в скором времени человек сумеет достичь еще бо́льших глубин.

Может показаться, что на большой глубине, под колоссальным давлением в 800—1000 *кГ/см²*, вода так сжата, что вес ее в объеме батискафа (или, другими словами, выталкивающая сила) будет настолько большой, что сможет мешать дальнейшему погружению. Но это не так! Ведь жидкости почти не сжимаются. Поэтому и выталкивающая сила практически не меняется с глубиной.

Известен такой опыт: открытый эбонитовый сосуд от испорченного аккумулятора заполняют водой и простреливают из малокалиберной винтовки. Так как пуля проходит через слой жидкости за очень короткое время, вода не успевает подняться вверх и сжимается на величину объема пули. Давление за эти мгновения настолько возрастает, что сосуд разлетается на куски. Когда же стреляют в пустой сосуд, то в нем появляются только две небольшие дырочки. Теперь понятно, почему подводная лодка гибнет, когда на некотором расстоянии от нее взрывается глубинная бомба. Практическая несжимаемость жидкости используется и в батискафе. В то время как толщина стальных стенок полой гондолы равна 9 *см*, стенки бензинового поплавка имеют толщину всего в несколько миллиметров.

УПРЯМОЕ ПОЛЕНО. ЦЕНТР ДАВЛЕНИЯ

Полено никогда не будет плавать стоя. Сколько бы мы ни пробовали установить его вертикально, упрямое полено будет падать на бок и плавать только плашмя (рис. 14). Чтобы понять, почему так получается, придется оглянуться назад.

Куда направлена выталкивающая сила? Чему она равна?

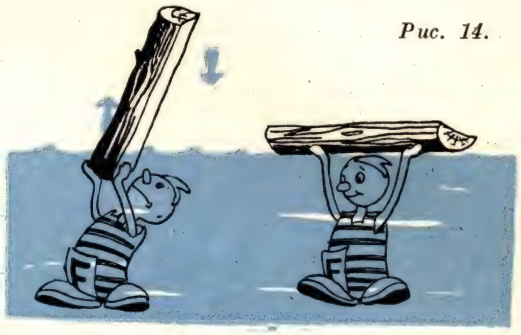


Рис. 14.

Ответить на эти вопросы может каждый шестиклассник. Но многие ли задумывались над тем, к какой же точке тела приложена выталкивающая сила?

Оказывается, точка приложения выталкивающей силы находится в центре тяжести вытесненного телом объема жидкости. Эта точка называется **центром давления**. Теперь понятны причуды упрямого полена, которое все время ложится на бок. Стоило ему чуть отклониться от вертикального положения, как пара сил — вес и выталкивающая сила — опрокидывали его (рис. 15).

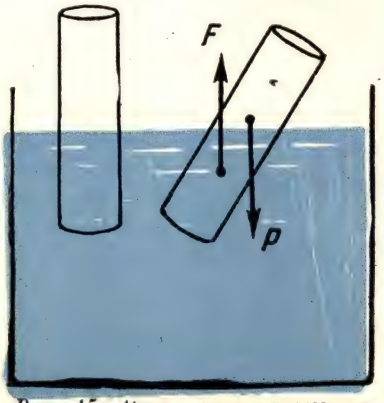


Рис. 15. Вес и выталкивающая сила «кладут» полено на бок.

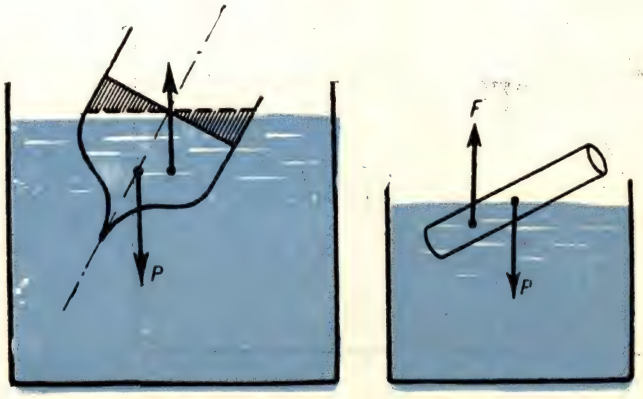


Рис. 16. Плавающее плашмя полено и корабль обладают устойчивостью.

ОТ ПОЛЕНА — К КОРАБЛЮ. ЦЕНТР ДАВЛЕНИЯ ПУТЕШЕСТВУЕТ

Кусок полена, плавающий плашмя, с точки зрения устойчивости, или, как говорят, остойчивости, вполне аналогичен кораблю. Пусть корабль (на рис. 16 схематически показан разрез) от качки или от ветра накренился в сторону. Величина выталкивающей силы при этом не изменилась, так как насколько объем погруженной части увеличится справа от осевой линии корабля, настолько же он уменьшится слева. Но раз справа вытеснен больший объем жидкости, то это значит, что центр тяжести вытесненного объема жидкости тоже переместился вправо от осевой линии. Другими словами, центр давления сместился вправо от осевой линии. Оказывается, центр давления путешествует! В этом-то и все дело. Теперь вес и выталкивающая сила образуют пару сил, которая возвращает корабль в положение равновесия.

ВСЕГДА ЛИ СУЩЕСТВУЕТ ВЫТАЛКИВАЮЩАЯ СИЛА? СОПРИКОСНОВЕНИЕ С ДНОМ

Покроем дно стеклянного сосуда тонким ровным слоем парафина. Сверху положим кусок парафина с очень гладким основанием. Если осторожно налить в сосуд воду, кусок парафина не всплывет. В чем же дело? Ведь парафин легче воды. Неужели нарушен закон Архимеда?

Вспомним, почему возникает выталкивающая сила. Если любой предмет со всех сторон окружен жидкостью, то давление жидкости снизу всегда больше, чем сверху. Это и служит причиной появления выталкивающей силы. В нашем опыте вода не проникает под лежащий на дне кусок парафина, а давит на него только сверху.

Если мы будем наклонять сосуд, то придавленный водой парафин будет только скользить по дну.

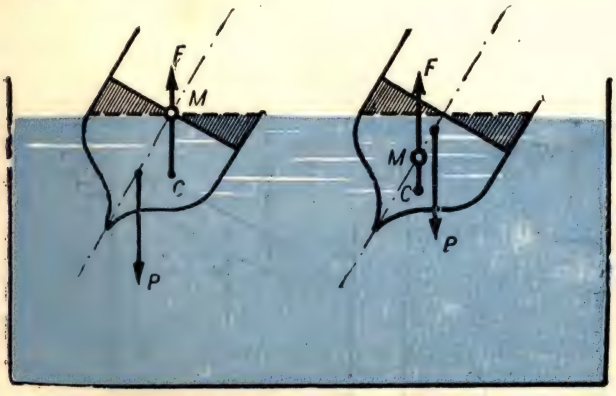
Таким образом, равнодействующая всех сил, действующих на этот кусок парафина, направлена вертикально вниз. Так как выталкивающая сила изменила свое обычное направление на противоположное, то ее условно можно назвать отрицательной.

Теперь понятно, почему подводная лодка, лежащая на мягком грунте, даже опорожнив свои балластные цистерны, не сразу поднимается вверх. Она сможет всплыть только тогда, когда вода попадет под ее корпус.

Интересно отметить, что если площадь соприкосновения тела, погруженного в жидкость, с дном постепенно уменьшается, то существует такой момент, когда выталкивающая сила будет равна нулю. Затем она становится положительной и тело всплывет.

Нужно запомнить, что выталкивающая сила может быть не только положительной, но и равной нулю или отрицательной, т. е. направлена вертикально вниз, когда тело соприкасается с дном водоема или сосуда.

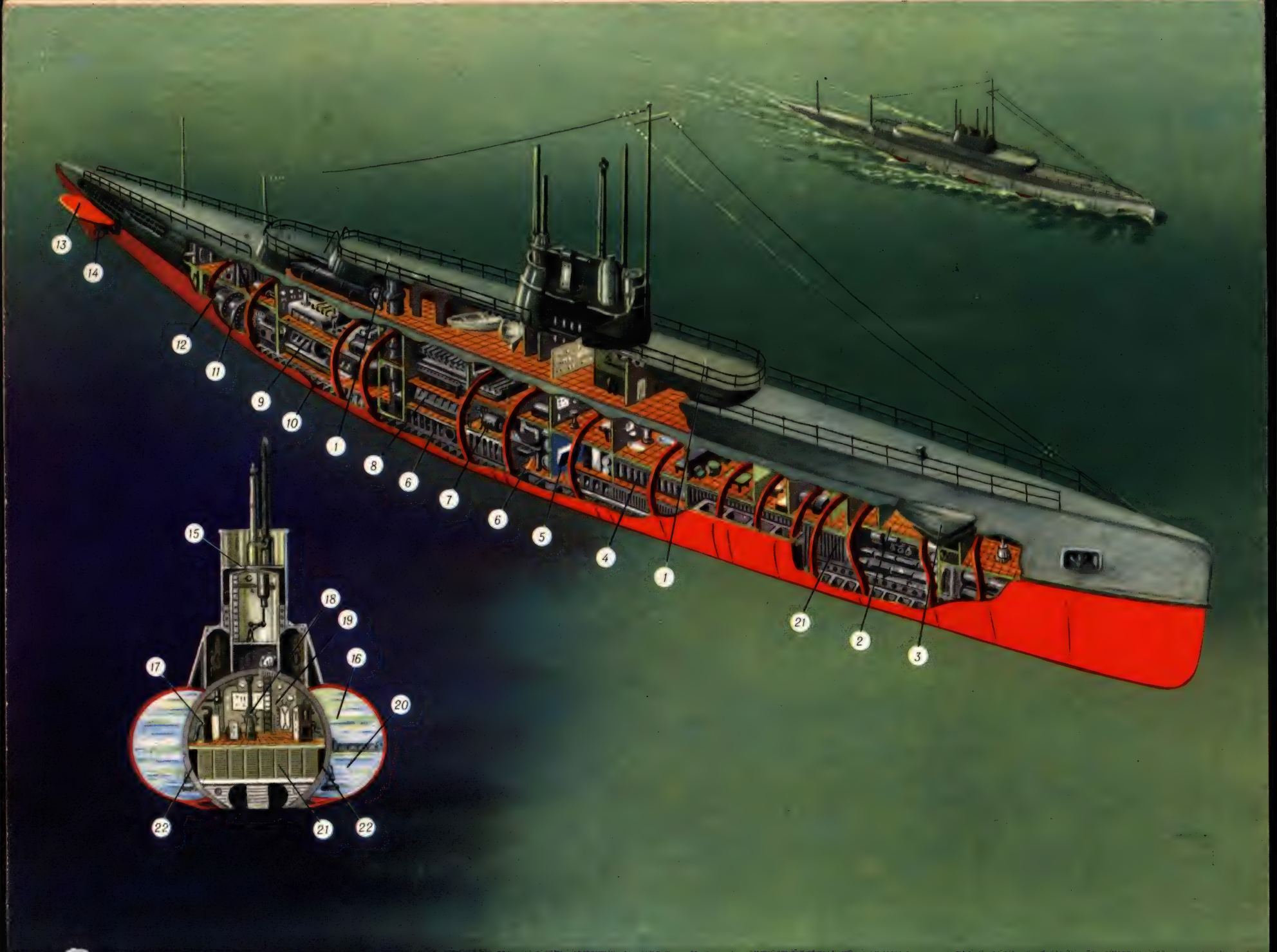
Рис. 17.

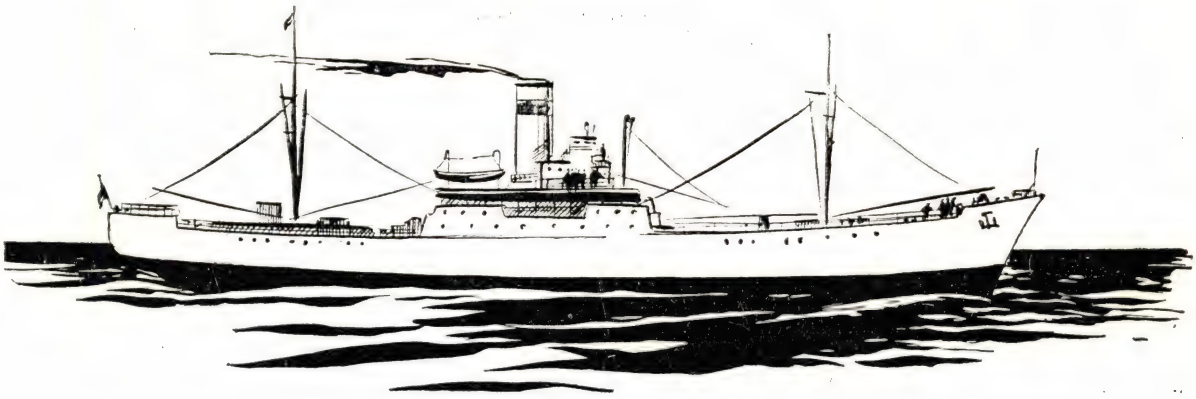


СЛЕДИ ЗА СТРОГОСТЬЮ ДОКАЗАТЕЛЬСТВ. И НАДЕЖНЫЙ ДРУГ МОЖЕТ ПОДВЕСТИ. МЕТАЦЕНТР

Мы знаем, что при наклоне корабля центр давления смещается от осевой линии в ту же сторону. А то, что образуется пара сил, возвращающая корабль в положение равновесия, мы

Таблица. 8. Люди с аквалангами нашли судно, затонувшее 2000 лет назад.


13
14
12
11
9
10
1
8
6
7
6
5
4
1
21
2
3
15
18
19
17
16
20
22
21
22



показали только что на чертеже. С его помощью нагляднее и проще можно представить себе многие положения.

Однако и на Солнце бывают пятна. И даже такой надежный друг, как чертеж, может подвести, если он сделан неверно или если то, что мы на нем изобразили, не является единственно возможным случаем. Когда корабль наклоняется, например, вправо, то и центр давления, естественно, смещается вправо. Но здесь возможны два случая (как показано на рис. 17), а мы пока рассмотрели только один.

Точка пересечения вертикальной линии, которая проходит через центр давления, с осевой линией корабля называется м е т а ц е н т р о м. Если он находится выше центра тяжести судна, то образуется пара сил, возвращающих судно в положение равновесия.

Погрузку судов поэтому осуществляют так, чтобы центр тяжести судна оказался возможно ниже: тяжелые грузы помещают в нижнюю часть трюма, а легкие — в верхнюю часть трюма и на палубу.

Трюмы грузовых судов, идущих порожняком, иногда специально загружают балластом. Ведь если метацентр при каком-нибудь положении корабля окажется ниже центра тяжести, то судно будет все больше наклоняться, дальше отходить от положения равновесия и, наконец, перевернется (рис. 17, справа).

ЗАБАВНАЯ ВИНОГРАДИНА И ПОДЪЕМ ЗАТОНУВШИХ СУДОВ. ДОРОГИ ЧЕРЕЗ РЕКИ

Бросим виноградину в стакан с лимонадом. Она пойдет на дно. Но когда к ней прилипнут пузырьки углекислого газа, то выталкивающая сила, действующая на виноградину и пузырьки газа, станет больше их суммарного веса и виноградина всплывет на поверхность. Здесь пузырьки газа лопнут, и виноградина опять пойдет на дно. Так будет повторяться много раз.

Подъем затонувших судов основан на этом же принципе: большие железные резервуары — п о н т о н ы — заполняют водой и топят по обе стороны корабля. Затем водолазы соединяют их широкими стальными лентами, подведенными под корпус корабля. Сжатым воздухом из понтонов выгоняют воду, и огромные поплавки поднимают судно.

Понтоны часто используют как плавучую опору при постройке мостов — там, где ставить каменные быки сложно и дорого. Так, еще в 1895 г. в Риге был построен понтонный мост через Даугаву, который действует и по сегодняшний день. Перед ледоставом понтонные мосты разводят, а понтоны отводят в затоны на зимовку. Если понтонный мост проложен через судоходную реку, то в нем делают разводные звенья для пропуска судов.

Таблица 9. Внешний вид и разрез подводной лодки: *1.* Место расположения вооружения. *2.* Дифферентная цистерна. *3.* Правый носовой горизонтальный руль. *4.* Аккумуляторы. *5.* Баллоны со сжатым воздухом. *6.* Цистерны с горючим. *7.* Динамо-машины. *8.* Вспомогательные дизели. *9.* Зарядный погреб. *10.* Балластные и топливные цистерны между внутренним и внешним корпусами. *11.* Главные электродвигатели. *12.* Электродвигатели экономического хода (замедленного). *13.* Кормовой правый горизонтальный руль. *14.* Правый винт. *15.* Выходной побочный люк. *16.* Бортовые цистерны главного балласта. *17.* Водоотливные трубы. *18.* Штурвал вертикального руля. *19.* Трап в боевую рубку. *20.* Трубы для осушения цистерн. *21.* Аккумуляторная яма. *22.* Баллоны сжатого воздуха.

Велико значение понтонов и в военном деле. Для постройки переправы несколько понтонов ставят в ряд поперек реки и скрепляют между собой. Поверх них укладываются стальные или деревянные балки и настил. Цепочка понтонов тянется с одного берега на другой — и дорога через реку готова. По такой дороге могут проходить танки, автомашины, артиллерия, не говоря уже о пехоте.

ВОДОИЗМЕЩЕНИЕ И СОЛЕНОСТЬ МОРЕЙ

Извергая клубы дыма и пыхтя, маленький буксир тянет за собой целый караван барж, каждая из которых больше своего поводыря. Но для того чтобы указать размеры судна, моряки обыкновенно говорят не о его линейных размерах, а о его водоизмещении. Если судно имеет водоизмещение в 5 тыс. тонн, это значит, что вытесненная им вода, когда он нагружен до нормы, весит 5 тыс. *Т*. Вес корабля с грузом в этом случае также равен 5 тыс. *Т* — ведь, когда тело плавает, его вес равен весу вытесненной им жидкости. На обшивке судна можно сделать отметку, соответствующую погружению при полной нагрузке.

Корабли эскадры адмирала Ушакова.

Но представьте себе, что наш корабль перешел из одного океана в другой, где вода более соленая. Водоизмещение, равное весу судна, при этом, понятно, не изменится, но уровень погружения станет меньшим. Поэтому на обшивке делают не одну, а несколько отметок.

Так как с поверхности водоемов испаряется только пресная вода, то на юге, где испарение велико, а дождей выпадает мало, соленость воды может быть очень велика. В Кара-Богаз-Голе — заливе Каспийского моря — человек не может утонуть, так как удельный вес воды в заливе больше, чем средний удельный вес человека. Озеро Баскунчак и Мертвое море обладают тем же свойством.

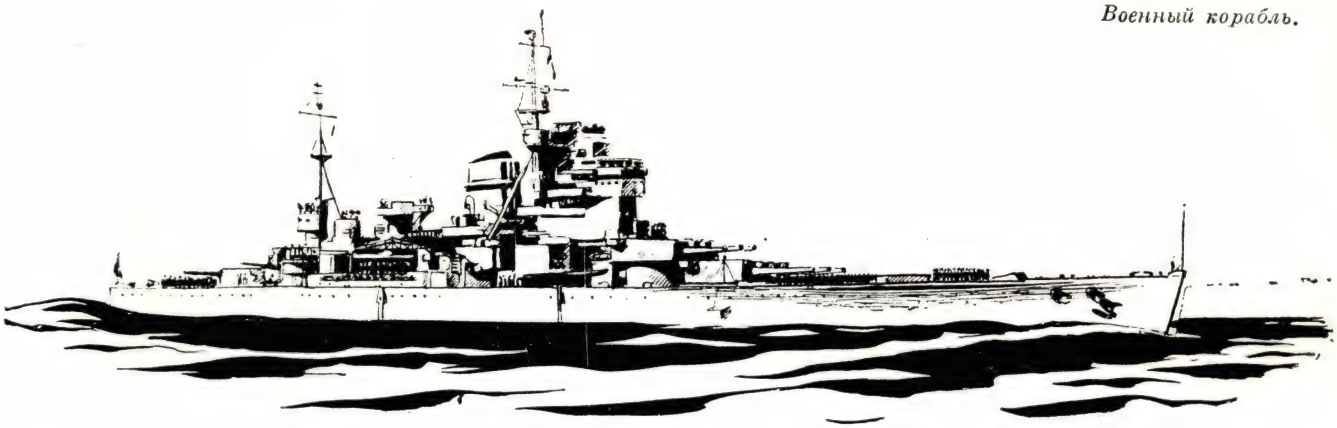
КАТАСТРОФА В САУТГЕМПТОНЕ. АКАДЕМИК КРЫЛОВ. КОРОТКО О НАШЕМ ФЛОТЕ

Английский линейный корабль «Роял Джордж», стоявший на рейде Саутгемптона, немного наклонили, чтобы очистить днище от ракушек и водорослей. Для этого пушки с одного борта откатили к центру судна, а с другого — отодвинули ближе к краю. Судно получило небольшой и совершенно безопасный крен. Но по небрежности забыли закрыть пушечные люки. Вода через них постепенно просочилась в трюмы, и корабль перевернулся. Погибло 900 человек вместе с адмиралом, командующим эскадрой.

Знаменитый кораблестроитель академик Алексей Николаевич Крылов, последователь ученого и флотоводца адмирала С. О. Макарова, много лет работал над проблемами остойчивости и непотопляемости корабля. Он часто приводил в пример эту катастрофу для подтверждения той мысли, что запас плавучести судна измеряется объемом его надводной части. Действительно, пусть даже борта корабля высоко подняты над поверхностью воды, но, если в них есть какие-либо незакрытые отверстия, запас его плавучести резко снижается.

А. Н. Крылов отмечал, что иногда даже нужно искусственно уменьшать запас плавучести. Известно, что корабль разделен на водонепроницаемые отсеки. Попав в поврежденный отсек, вода может придать кораблю опасный крен.

Еще в 1904 г. А. Н. Крылов разработал для определенных типов военных кораблей таблицы непотопляемости. В них он, в частности, указал, как, пожертвовав некоторым



Военный корабль.

запасом плавучести, с помощью затопления подводных отсеков другого борта, можно сохранить поврежденный корабль на плаву́. Но предложения ученого царское адмиралтейство положило под сукно.

Инженер броненосца «Орел» В. П. Костенко, знакомый с таблицами Крылова, по своей инициативе устроил на корабле систему выравнивания. И во время Цусимского боя, несмотря на тяжелые повреждения, этот корабль остался на плаву́. А получившие такие же повреждения броненосцы «Александр III», «Бородино», «Суворов» опрокинулись и затонули.

В нашей стране за годы Советской власти создан сильный Военно-Морской Флот, в строительстве которого активное участие принимал А. Н. Крылов. Наши торговые суда бороздят все океаны мира, а на севере СССР работает самый мощный ледокольный флот.

В 1959 г. в СССР вступил в строй первый в мире атомный ледокол «Ленин», ставший флагманом Полярного флота. Атомные двигатели, 134 *м* длины, 16 тыс. *Т* водоизмещения, оригинальная конструкция делают его одним из самых замечательных судов нашего времени.

Энергетическое сердце корабля — три мощных атомных реактора. Им понадобится в сутки лишь несколько десятков граммов ядерного горючего. Непрерывным ходом ледокол сможет продвигаться во льдах двухметровой толщины.

Атомный ледокол продлит навигацию по Северному морскому пути почти в два раза.

В конструкции атомохода нашла отражение разработанная акад. А. Н. Крыловым теория непотопляемости. Одиннадцать водонепроницаемых переборок сохранят корабль на плаву́ даже в том случае, если будут затоплены два главных отсека.

На самом ли деле ледокол колет лед? Нет, это представление неверно. Корпусу ледокола придается такая форма, чтобы нос его с разгона въезжал на лед. Выталкивающая сила уменьшается, и некомпенсированная ею часть веса корабля ломает, продавливает лед.

ЛОВУШКА ДЛЯ ВЕТРА

Мы рассказали о том, как ведут себя жидкости в состоянии покоя, рассказали о законах гидростатики. Но часто ли жидкость бывает совершенно неподвижна? Не задумываясь, можно сказать, что довольно редко.

Наука о движущейся жидкости называется гидродинамикой. Законы этой науки более сложны, в школе их изучают совсем мало. Поэтому мы о них говорить не будем.

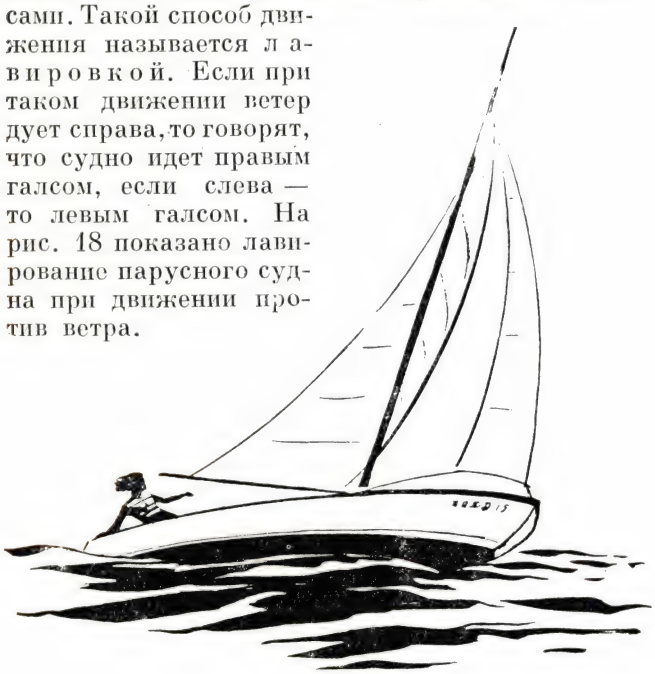
Приведем несколько примеров, которые помогут объяснить некоторые явления, с которыми вы встречаетесь в повседневной жизни.

Всем известный фантазер и враль барон Мюнхаузен любил рассказывать, как однажды во время его путешествия по России громадный волк набросился на лошадь, впряженную в его сани. Чудовищный зверь съел заднюю половину лошади и, когда передняя часть лошади выпала из упряжки, волк оказался впряженным в сани. На такой необыкновенной упряжке барон галопом влетел в Петербург. Неправдоподобность этого рассказа вызывает улыбку.

Однако человеческий ум сумел поймать и запрячь в свои экипажи могучую и грозную стихию — ветер. Ловушкой для него послужил кусок полотна — парус. Благодаря парусу стремительно несется по воде легкая и изящная спортивная яхта. А немногим более столетия назад под парусами ходили линейные корабли, несшие на себе до 120 пушек. В XX в. парусные суда используются в основном для

спортивных, учебных и промысловых целей. Как наиболее дешевый вид транспорта, они сохранились в тех странах, где постоянно дуют пассаты или есть сезонные ветры — муссоны.

Парусное судно управляется не только парусами, но и рулем. Оно может двигаться против ветра, используя в то же время его силу. Но в этом случае ему приходится перемещаться только по ломаной линии переменными галсами. Такой способ движения называется лавировкой. Если при таком движении ветер дует справа, то говорят, что судно идет правым галсом, если слева — то левым галсом. На рис. 18 показано лавирование парусного судна при движении против ветра.



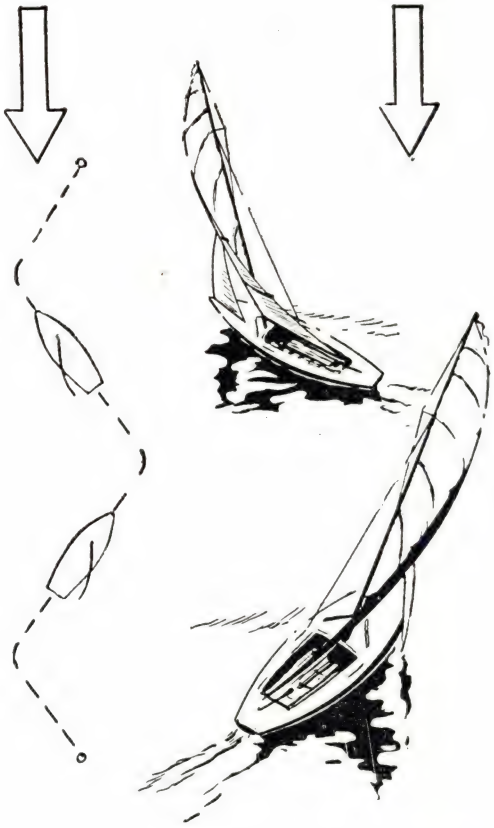


Рис. 18. Лавирование парусного судна.

ГИДРОСТАТИКА — ЭТО ТОЛЬКО ОДНА УЛИЦА «БОЛЬШОГО ГОРОДА» ФИЗИКИ

Представьте себе, что вы переехали жить в какой-нибудь большой город и хотите его изучить. Сначала вы освоитесь в своем районе, запомните дорогу в школу, в кино, в ближайшие магазины, выберетесь в театр или на стадион, поедете к знакомым. Так постепенно вы будете узнавать другие районы города, и отдельные улицы, которые раньше казались вам совершенно чужими и разными. И, наконец, город предстанет перед вами как единое целое.

Такое знакомство с городом похоже на изучение любой науки, например физики. В этой статье вы познакомились в основном только с одной улицей большого города физики — с гидростатикой, но эта улица очень похожа на другую улицу — аэростатику, науку о покоящихся газах.

Так же как правила уличного движения справедливы для всех улиц, так для наук гидростатики и аэростатики справедливы одни и те же законы Архимеда и Паскаля.

Аэростат, выбросив балласт, начнет подниматься вверх так же, как подводная лодка после освобождения своих балластных цистерн. Если же жидкость или газ движутся, то и здесь между ними есть много общего: движущееся судно и летящий самолет оба испытывают сопротивление, порожденное окружающей средой. Двигатель судна, так же как и мотор самолета, бесполезно тратит часть совершаемой работы на создание волн. Наконец, жидкость может обращаться в пар — газ, а пар — в жидкость.

Прочитав несколько статей этого тома, вы мысленно совершите путешествие по многим улицам большого города физики и у вас начнут вырисовываться его грандиозные очертания.

ЛЕТАТЕЛЬНЫЕ МАШИНЫ

Самолеты, планеры, вертолеты, конвертопланы и другие летательные машины служат для перевозок пассажиров и грузов, для научных исследований, а также для военных целей. Некоторые самолеты летают быстрее урагана, быстрее звука, быстрее пуль и артиллерийских снарядов. (Скорость урагана иногда достигает 200 *км/час*; скорость звука — 1200 *км/час*; скорость бронебойного снаряда — около 2000 *км/час*; наибольшая скорость самолета превысила 3000 *км/час*.)

ФИЗИКА ПОЛЕТА

Действие летательных машин основано на законах науки о движении газов.

Течение воздуха. Законы движения газов изучают либо при свободном полете моделей, либо при течении воздуха по так называемым аэродинамическим трубам (рис. 1 и цв. табл. на стр. 304). Первая в мире аэродинамическая труба была построена изобретателем ракетного двигателя К. Э. Циолковским в 1897 г. На эту трубу пошло совсем немного теса и несколько листов кровельного железа. Современные аэродинамические трубы представляют собой сложные и дорогие сооружения, обслуживаемые большим числом ученых, инженеров и рабочих.

В трубах прерывного действия воздух подается из батареи газгольдеров, куда его нагнетают мощные компрессоры (цв. табл. на стр. 304). В трубах непрерывного действия воздух подается компрессором, который приводится в действие электромотором (см. рис. 1).

Мощность силовых установок современных сверхзвуковых аэродинамических труб достигает десятков и сотен тысяч лошадиных сил.

Рассмотрим течение воздуха по трубе прерывного действия (верхний рисунок на цв. табл. на стр. 304). В больших баллонах — газгольдерах — сжатый воздух почти неподвижен. На нашем рисунке сжатый воздух изображен голубым цветом. Во время работы трубы воздух из газгольдеров по широким и прочным трубопроводам поступает в воздухоприемник, или ресивер. Манометры, установленные на ресивере, показывают почти такое же давление, как и в газгольдерах. Скорость воздуха все еще мала. Для измерения скорости применяются особые приборы — махметры. По мере удаления от ресивера труба сужается, скорость потока, как скорость горной реки, протекающей через ущелье, увеличивается. Помните, как сказано у Лермонтова:

Терек воет дик и злобен
Меж утесистых громад,
Буре плач его подобен,
Слезы брызгами летят.
Но, в равнине растекаясь,
Он лукавый принял вид...

При приближении к узкому сечению скорость увеличивается, потому что через него проходит в секунду столько же воздуха, сколько и через широкое сечение.

По инерции все тела движутся прямолинейно и равномерно. По какой же причине возрастает скорость течения? Ответ на этот вопрос дают манометры, которые показывают, что в узком сечении трубы давление меньше, чем было в широком. Под действием разности давлений возникает сила, направленная от широкого участка к узкому, которая и заставляет воздух двигаться ускоренно. При течении воды или любой другой жидкости имеет место следующий закон, названный по имени открывшего

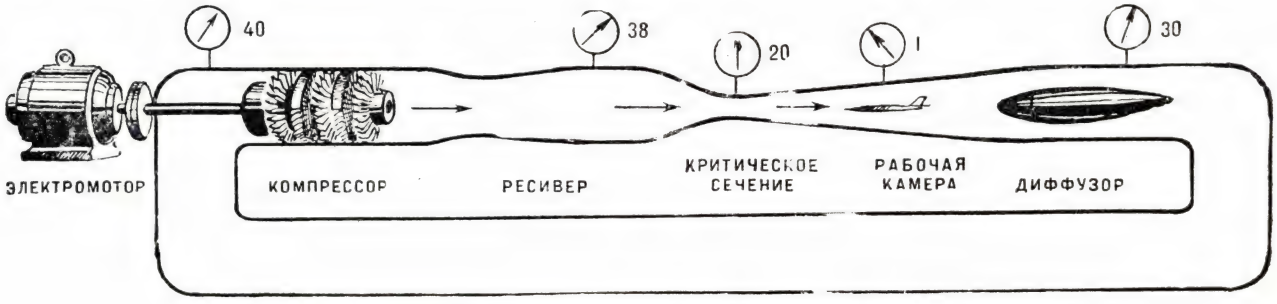


Рис. 1. Схема сверхзвуковой аэродинамической трубы непрерывного действия.

его ученого законом Бернулли: *При увеличении скорости потока давление понижается, а при уменьшении скорости потока давление возрастает.* Статическое давление, существующее в потоке, измеряют манометрической трубкой, отверстие которой параллельно потоку (рис. 2). Если расположить отверстие трубки навстречу потоку, жидкость, попадающая в трубку, затормозится, давление возрастет и манометр будет показывать полное давление.

При течении воздуха (или любого другого газа) с малой скоростью — меньше 100 *м/сек* — изменения давления бывают невелики и плотность можно считать постоянной. В этом случае законы течения газа будут такими же, как законы течения жидкости. Поэтому закон Бернулли имеет большое значение для авиации. Но, в отличие от жидкостей, газы могут сжиматься и расширяться.

При понижении давления воздух расширяется, его плотность убывает. Изменения плотности заметны при больших изменениях скорости.

На цветной таблице (стр. 304) уменьшение плотности показано изменением интенсивности голубого цвета.

Ясно, что для протекания разреженного газа требуется более широкое проходное сечение, чем для сжатого. И вот при уменьшении давления потока газа вступают в борьбу два обстоятельства: увеличение скорости и уменьшение плотности газа. При малых понижениях давления преобладает рост скорости, поэтому, для того чтобы давление воздуха падало, а скорость увеличивалась, сечение трубы должно уменьшаться. В самом узком, «критическом» сечении трубы скорость течения становится равной местной скорости распространения звука, а давление понижается, как показывают манометры, почти в два раза. При дальнейшем понижении давления скорость воздуха будет продолжать расти и станет больше скорости звука, но плотность воздуха уменьшится так значительно, что, для того чтобы пропустить весь поток, трубу придется сделать расширяющейся (рис. 1 и цв. табл. на стр. 304).

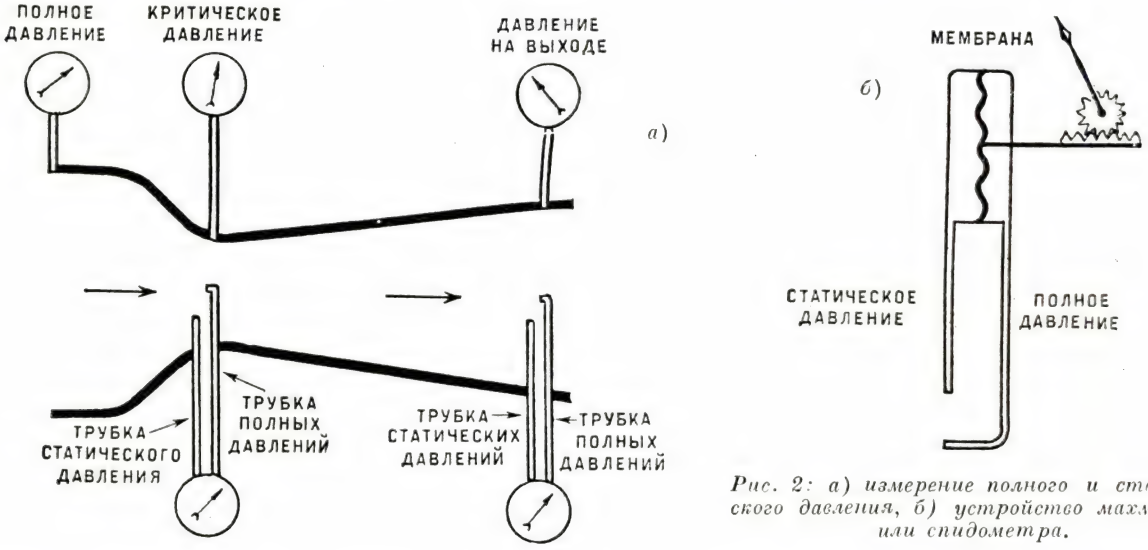
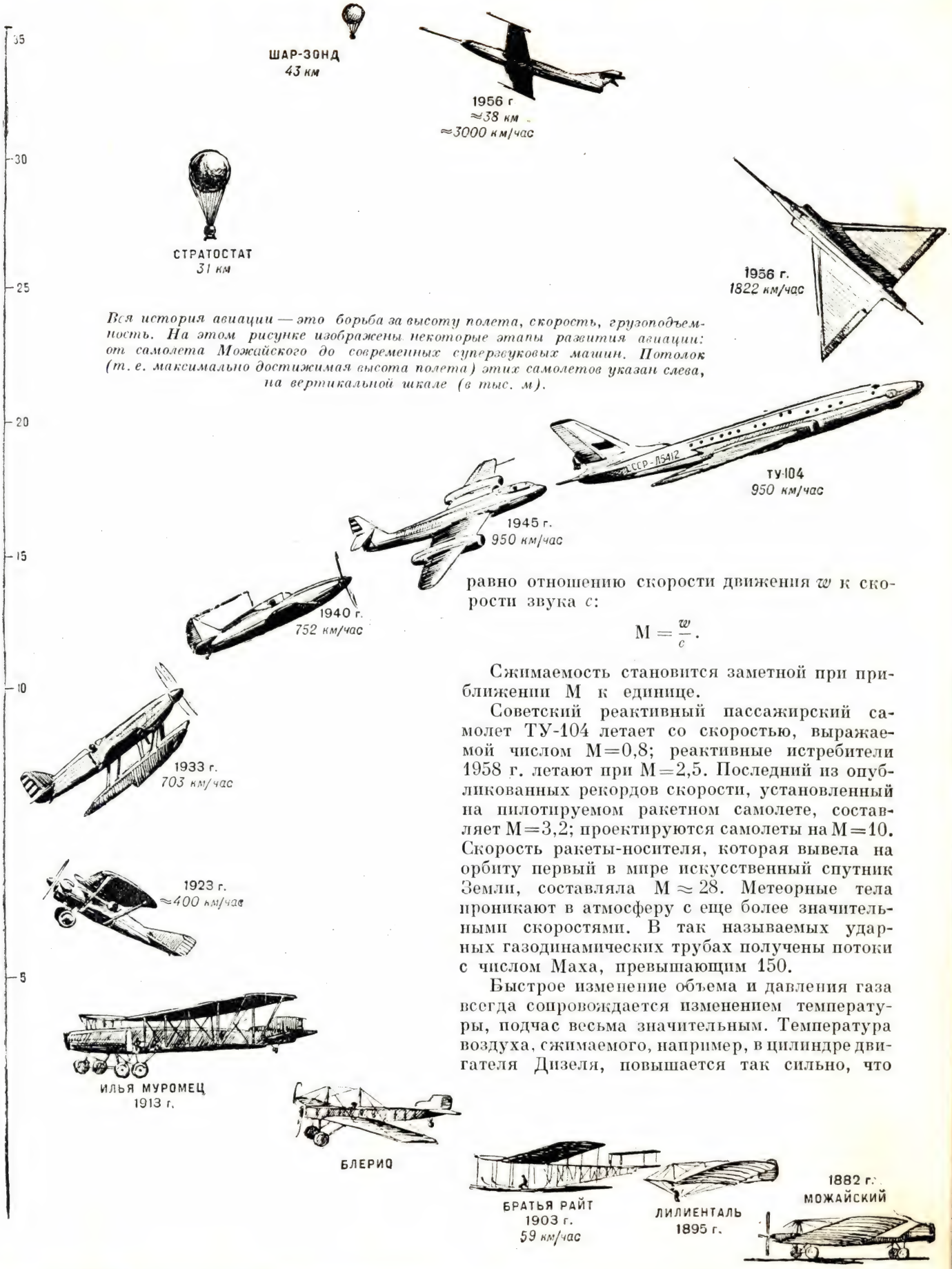


Рис. 2: а) измерение полного и статического давления, б) устройство махметра, или спидометра.

Итак, ускорение дозвукового потока воздуха (так же как и ускорение дозвукового потока жидкости) происходит в сужающейся трубе. Ускорение сверхзвукового потока воздуха происходит в расширяющейся трубе, если давление на выходе из трубы меньше, чем в самом узком сечении; в противном случае движение воздуха не ускорилось бы, а вновь замедлялось, и сверхзвукового потока не получилось.

Раздел механики, изучающий движение воздуха с дозвуковыми скоростями, называется **аэродинамикой**. Движение газов со сверхзвуковыми скоростями изучается **газодинамикой**.

Для того чтобы сразу было ясно, следует ли учитывать сжимаемость воздуха, скорость удобно измерять так называемыми **числами Маха**, названными по имени одного из основателей газодинамики. Число Маха — М



Вся история авиации — это борьба за высоту полета, скорость, грузоподъемность. На этом рисунке изображены некоторые этапы развития авиации: от самолета Можайского до современных сверхзвуковых машин. Потолок (т. е. максимально достижимая высота полета) этих самолетов указан слева, на вертикальной шкале (в тыс. м).

равно отношению скорости движения w к скорости звука c:

$$M = \frac{w}{c}.$$

Сжимаемость становится заметной при приближении M к единице.

Советский реактивный пассажирский самолет ТУ-104 летает со скоростью, выражаемой числом M=0,8; реактивные истребители 1958 г. летают при M=2,5. Последний из опубликованных рекордов скорости, установленный на пилотируемом ракетном самолете, составляет M=3,2; проектируются самолеты на M=10. Скорость ракеты-носителя, которая вывела на орбиту первый в мире искусственный спутник Земли, составляла M ≈ 28. Метеорные тела проникают в атмосферу с еще более значительными скоростями. В так называемых ударных газодинамических трубах получены потоки с числом Маха, превышающим 150.

Быстрое изменение объема и давления газа всегда сопровождается изменением температуры, подчас весьма значительным. Температура воздуха, сжимаемого, например, в цилиндре двигателя Дизеля, повышается так сильно, что

впрыскиваемое в цилиндр горючее воспламеняется само собой. Изменения температуры происходят и при течении газа. Например, при расширении газа в аэродинамической трубе его скорость увеличивается, давление падает и температура понижается. При торможении потока его давление, плотность и температура возрастают тем значительнее, чем больше была начальная скорость.

Изменения давления и температуры, которыми сопровождаются всякие изменения скорости воздуха, имеют важнейшее значение в авиации. Воздух, набегающий на летящий самолет, снаряд или ракету, затормаживается: его давление и температура возрастают. Возникшие разности давлений создают подъемную силу крыльев и силу сопротивления полету. При сверхзвуковом полете повышение температуры и давления бывает очень значительным. Так, при M=3, даже если полет происходит в стратосфере, где температура равна —56°,5, температура заторможенного потока, прилегающего к поверхности самолета, достигает +333°, и, если не принять особых мер для охлаждения, летчик будет себя чувствовать так, как будто его кабину поместили в духовку, где подрумянивается жаркое.

При M=6 температура заторможенного воздуха становится выше, чем внутри сталеплавильной печи. При проникновении в атмосферу метеорного тела, скорость которого превышает 11 *км/сек*, температура сжимаемого воздуха выше точки плавления любого из известных твердых веществ.

Резкое увеличение температуры при торможении сверхзвукового потока называют тепловым барьером. Тепловой барьер ограничивает рост скорости самолетов при полете в атмосфере. Поэтому искусственные спутники Земли и баллистические ракеты дальнего действия могут летать только в крайне разреженных слоях атмосферы или за ее пределами.

Относительные повышения температуры, давления и плотности воздуха во время торможения при различных начальных числах Маха составляют:

M	0,5	1,0	2,0	3,0	4,0	5,0
$T_{тор}/T$	1,05	1,2	1,8	2,8	4,2	6,0
$p_{тор}/p$	1,19	1,89	7,8	37	150	528
$\gamma_{тор}/\gamma$	1,13	1,575	4,34	13,3	36	88

Аэродинамические силы. На самолеты, ракеты, снаряды и другие тела, движущиеся в воздухе, действуют так называемые аэродинамические силы. Всякий раз, когда мы гуляем в ветреную погоду или высовываемся на ходу из окна вагона, мы на себе испытываем действие аэродинамических сил. Сила, с которой воздух, действуя на крылья самолета, удерживает его в полете; сила, с которой ураган раскачивает и вырывает деревья; сила, которая постепенно затормаживает искусственные спутники Земли, выведенные на орбиту,— все эти силы являются аэродинамическими.

Аэродинамические силы не зависят от того, что́ в действительности движется: воздух или самолет. Важна только их относительная скорость. Аэродинамические силы изучают на опыте. Французский инженер Эйфель (1831—1923), строитель знаменитой 315-метровой башни, наблюдал взаимодействие тел с воздухом, сбрасывая модели с ее верхних этажей.

Выдающийся русский ученый Н. Е. Жуковский впервые поставил опыты в аэродинамической трубе, построенной им в Московском высшем техническом училище (МВТУ).

Относительные скорости воздушного потока в опытах Эйфеля, Жуковского и Циолковского, начавшего свои исследования несколькими годами ранее, не превышали десятков метров в секунду, т. е. были гораздо меньше скорости звука. Однако уже в те далекие годы, наблюдая за полетом снарядов, ученые-артиллеристы изучали аэродинамические силы при сверхзвуковых скоростях. В настоящее время взаимодействие воздуха с движущимися телами изучают и при свободном полете моделей, и в аэродинамических трубах.

Исследования в трубах называются продувками. Исследуемую модель крыла, самолета, ракеты или другой летательной машины помещают в трубу, соединив ее рычагами

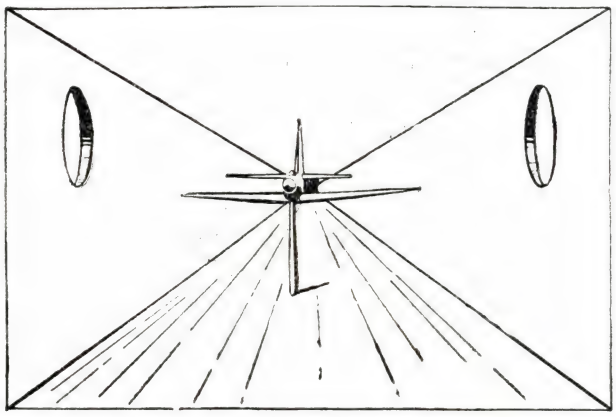


Рис. 3. Аэродинамические весы в рабочей камере трубы.

и тягами с аэродинамическими весами, которые дают возможность измерять не только величину, но и направление действующих сил (рис. 3). Современные аэродинамические весы представляют собой сложный и чувствительный прибор.

Всякий школьный физический кружок может изготовить модель аэродинамической трубы с упрощенными весами, использовав обыкновенный пылесос и детали от детского «Конструктора» (рис. 4). Мешочек для собирания пыли можно вынуть, а на выходе из пылесоса для расширения «рабочего пространства» трубы вставить конус, склеенный из плотной чертежной бумаги.

Весы должны состоять из стойки с подвижным коромыслом, к которому прикреплены указатель и стержни для установки испытываемых моделей. Для измерения силы на коромысло нужно надеть проволочные грузики — рейтеры.

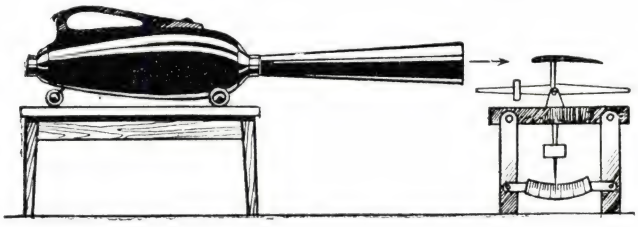


Рис. 4. Модель аэродинамической трубы и весов.

Продуваемые модели — крылья, самолеты, ракеты и другие — проще всего вылепить из пластилина. Хорошо, если у вас хватит терпения покрыть поверхность моделей ровным слоем фольги. Для изучения зависимости скорости течения от давления воспользуемся U-образными стеклянными манометрическими трубками, наполненными подкрашенной водой. Наконечники для отбора полного и статического давлений также можно изготовить из стеклянных трубок. Вылепим различные модели для продувок: шары, круглые пластинки, полые полушария, конусы, вытянутые каплеобразные тела диаметрами 1, 2 и 3 *см*. Будем поочередно устанавливать модели на весах, каждый раз так уравновешивая их противовесом, чтобы весы были в безразличном равновесии. Подадим воздух: появится аэродинамическая сила, и равновесие весов нарушится. Для возвращения указателя в исходное положение наденем на коромысло рейтер и будем передвигать его, пока равновесие не восстановится. Аэродинамическую силу, действующую на модель, найдем по закону моментов сил:

$$f = G\frac{l_1}{l_2},$$

где G — вес рейтера, l_1 и l_2 — плечи сил.

Рис. 5. Аэродинамическая сила обычно направлена под углом к движению.

Опыты с настоящими аэродинамическими весами показали, что аэродинамическая сила, вообще говоря, направлена под углом к направлению движения (рис. 5). По правилу параллелограмма ее можно разложить на силу бокового давления, направленную под прямым углом к потоку, и на силу сопротивления, направленную в сторону, противоположную движению. Если боковая сила направлена вверх, ее называют подъемной силой.

Сила сопротивления при движении тел в воздухе возникает всегда, во всех случаях. Боковая сила возникает в тех случаях, когда обдуваемое тело имеет несимметричную форму или когда оно расположено под углом к потоку. Наши весы дают возможность измерять силу сопротивления и подъемную силу поочередно.

Согласно вычислениям Ньютона, подтвержденным многочисленными опытами, аэродинамические силы пропорциональны произведению квадрата относительной скорости на плотность воздуха и на поперечное (миделевое) сечение обдуваемого тела. Что называют миделевым сечением, ясно из рис. 6. Поперечные сечения изготовленных нами моделей относятся, как 1 : 4 : 9.

С помощью наших весов мы найдем, что и силы сопротивления, испытываемые моделями одинаковой формы, но разных размеров, находятся в таком же соотношении. Наша аэродинамическая труба не дает возможности исследовать зависимость аэродинамических сил от относительной скорости и от плотности воз-

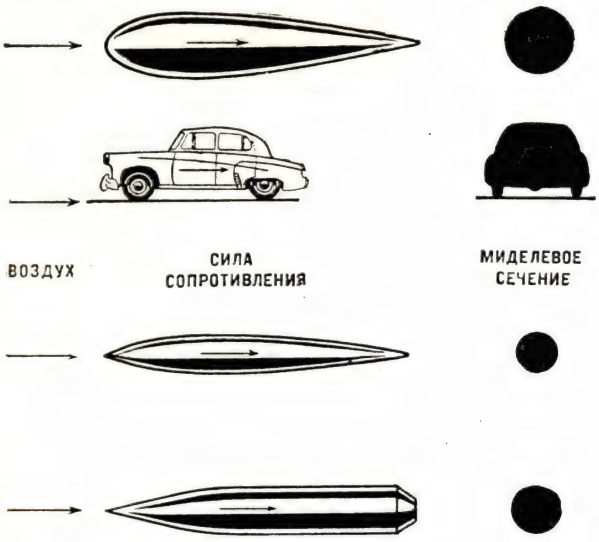


Рис. 6. Удобообтекаемые формы при различных скоростях. Справа показаны миделевые сечения.

духа. Некоторые настоящие трубы снабжены прочными непроницаемыми оболочками, позволяющими вести исследования при повышенном или при пониженном давлении.

Существенное влияние на аэродинамические силы оказывает форма обдуваемого тела. Наибольшее сопротивление испытывает полый полушар, обращенный открытой стороной навстречу потоку. Несколько меньшее сопротивление испытывает круглая пластинка. Наименьшее сопротивление (при дозвуковых скоростях) испытывают вытянутые тела с закругленным носом, заостренной кормой и гладкой поверхностью (рис. 6). Такую удобообтекаемую форму имеют фюзеляжи дозвуковых самолетов и кузовы гоночных автомобилей. Трудно поверить, пока не убедишься на опыте, что удобообтекаемое тело диаметром более 4 *см* и круглая пластинка диаметром 1 *см* испытывают равные сопротивления. Отметим, что форма, при которой сопротивление бывает наименьшим, зависит от скорости обтекающего потока. Так, при сверхзвуковых скоростях наиболее обтекаемыми оказываются тела с острым носком, цилиндрической боковой поверхностью и немного срезанной кормой (рис. 6). Поэтому естественно, что такую форму придают снарядам и ракетам.

Путем опытов в аэродинамических трубах удалось найти причины возникновения аэродинамических сил. Этими причинами являются трение, завихрение и волнообразование.

Силы трения возникают вследствие соударений молекул обтекающего воздуха с молекулами обдуваемого тела. Ударившись о поверхность тела, молекула воздуха теряет скорость. Слой газа, прилегающего к обдуваемому телу, затормаживается. По мере удаления от поверхности скорость воздуха возрастает, приближаясь к скорости невозмущенного потока. Область потока вблизи поверхности тела или стенок, на которую распространяется возмущающее действие сил вязкости, называется п о г р а н и ч н ы м с л о е м. При обтекании выступов или ребер пограничный слой отрывается от поверхности и образует вихри (рис. 7). Водяные вихри, возникающие при гребле позади весла, отчетливо видны невооруженным глазом. Подобного рода воздушные вихри можно наблюдать и фотографировать, подмешав к потоку, например, алюминиевый порошок.

При сверхзвуковых скоростях, помимо сил трения и вихрей в воздухе, возникают еще и ударные волны, отдаленно напоминающие те, которые расходятся по поверхности воды от носа моторной лодки. Ударные волны в сверхзвуковых трубах удается фотографировать.

При дозвуковых скоростях волн не возникает: набегающий воздух затормаживается постепенно, его давление также постепенно возрастает. Импульс давления, сообщаемый телом набегающему воздуху, распространяется со скоростью звука. Если скорость движения дозвуковая, набегающие массы воздуха успевают заблаговременно получить «весть» о приближении тела, скорость начинает меняться по величине и по направлению и воздух плавно обтекает тело. Если же скорость движения сверхзвуковая ($M > 1$), импульс давления, распро-

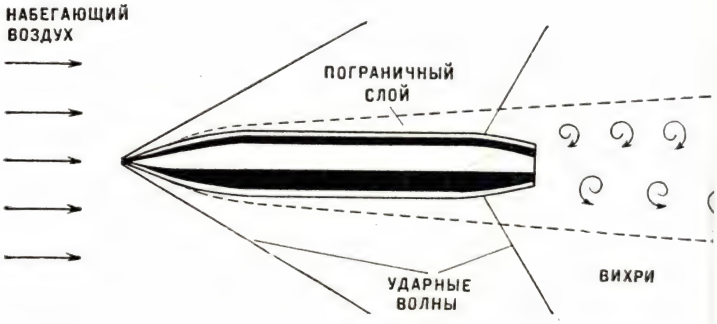


Рис. 7. При движении со сверхзвуковой скоростью возникают вихри и ударные волны.

страняющийся со скоростью звука, не успевает дойти до набегающих масс воздуха и изменить их скорость. Поэтому, встретившись с поверхностью тела, воздух затормаживается внезапно, на расстоянии, проходимом молекулами газа от одного столкновения до другого. Давление, температура и плотность воздуха также внезапно увеличиваются: возникает ударная волна. Повышение температуры и давления воздуха в ударной волне тем больше, чем больше убыль скорости. Чем больше число Маха и чем острее носок снаряда, тем меньше угол наклона волны. Повышенное давление, образующееся за волной, действует на лобовую поверхность тела, создавая так называемое волновое сопротивление.

Тупоконечные тела или круглые ядра создают более мощные ударные волны и испытывают большее волновое сопротивление, чем остроконечные снаряды или ракеты.

Энергия, затрачиваемая двигателем летательной машины на преодоление силы сопротивления, расходуется на трение, на образование вихрей и волн. Со временем вихри и волны рассеиваются, но их энергия не исчезает: она идет на нагревание потока.

При свободном падении в воздухе скорость возрастает до тех пор, пока сила сопротивления не станет равной весу. Дальнейшее падение происходит по инерции с постоянной скоростью. Чем больше «поперечная нагрузка», измеряемая отношением веса падающего предмета к миделевому сечению, тем больше скорость, при которой сила сопротивления сравнивается с силой тяжести. Мелкие пылинки падают со скоростью в доли миллиметра в секунду; дождевые капли — до 8 *м/сек*; парашютисты снижаются со скоростью около 5 *м/сек* (с такой же скоростью приземлится человек, спрыгнувший с высоты около полутора метров). При затяжном прыжке, когда парашютист некоторое время падает, не раскрывая парашюта, он снижается со скоростью около 60 *м/сек*; тяжелые авиабомбы падают в нижних слоях атмосферы со сверхзвуковой скоростью.

Силу аэродинамического сопротивления можно выразить алгебраической формулой. Сила сопротивления f прямо пропорциональна произведению миделевого сечения S в *кв. м* на плотность воздуха ρ в технических единицах массы на *куб. м* и на квадрат скорости w в *м/сек*:

$$f = c_x S \rho \frac{w^2}{2}.$$

Множитель c_x, называемый коэффициентом сопротивления, зависит от формы тела и от его скорости. При дозвуковых скоростях полета ($M \ll 1$) c_x можно считать постоянным.

Коэффициенты сопротивления c_x при дозвуковых скоростях $M \ll 1$

Полый полушар, открытый навстречу потоку	1,3
Круглая пластинка под прямым углом к потоку	1,1
Шар	0,4
Снаряд	0,15
Удобообтекаемое тело	0,05

При приближении скорости к звуковой величине c_x начинает расти, переходит через наибольшее значение при $M \approx 1{,}2$ и снова убывает. Коэффициенты сопротивления были измерены во время испытательных полетов и при продувках в аэродинамических трубах.

Зависимость коэффициента сопротивления ракеты от числа Маха

M	0,5	0,8	1,0	1,2	1,5	2,0	3,0	4,0	5,0	6,0
c_x	0,15	0,28	0,30	0,42	0,34	0,24	0,20	0,17	0,15	0,13

Увеличение коэффициента сопротивления вблизи скорости звука называют звуковым барьером. Для преодоления звукового барьера служат реактивные двигатели, способные развивать большую силу тяги при малом собственном весе.

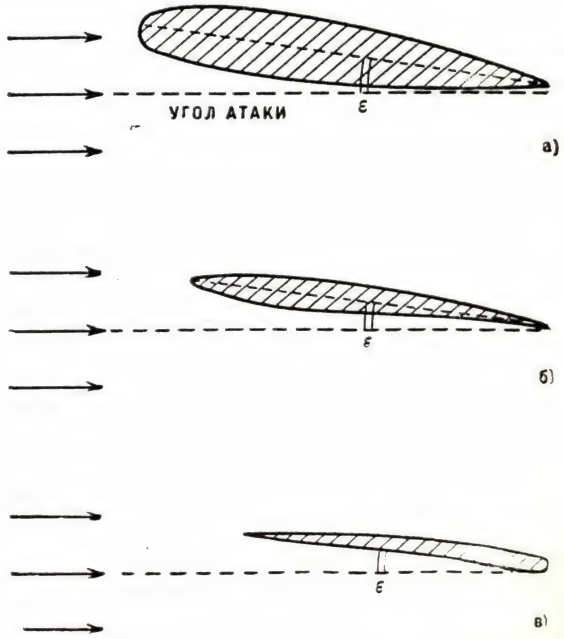


Рис. 8. Поперечные сечения — профили крыльев: а) дозвуковое, б) околозвуковое, в) сверхзвуковое.

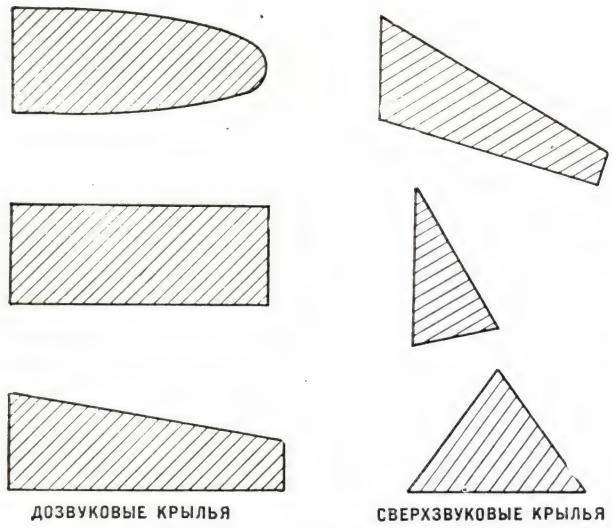


Рис. 9. Дозвуковые и сверхзвуковые крылья в плане.

Крыло. Самолеты, планеры и птицы удерживаются в полете аэродинамической подъемной силой, с которой движущийся воздух действует на крыло. Действующую на крыло аэродинамическую силу можно разложить на подъемную силу и на силу сопротивления. Помимо плотности воздуха и квадрата относительной скорости, эти силы зависят от площади крыла и от угла атаки (рис. 8). Углом атаки называется угол между хордой крыла и направлением потока ε.

Крыло вовсе не является плоскостью; его поперечное сечение, или, как говорят инженеры, «профиль», имеет довольно сложное очертание, выбираемое в зависимости от расчетной скорости полета. Профиль дозвукового крыла был математически рассчитан Н. Е. Жуковским на основании развитой им теории происхождения подъемной силы. С полным основанием можно сказать, что сотни тысяч построенных до настоящего времени дозвуковых самолетов летали и летают на крыльях Жуковского. Аэродинамические институты, такие, как ЦАГИ в Советском Союзе, NASA в США и другие, разрабатывают наивыгоднейшие формы крыльев для околозвуковых и для сверхзвуковых самолетов и дают рекомендации авиационным заводам. Дозвуковое крыло при рассматривании снизу имеет прямоугольную, трапециевидную или эллиптическую форму (рис. 9). Околозвуковые и сверхзвуковые крылья делаются стреловидными, дельтовидными или треугольными, так как при такой форме они возбуждают менее сильные ударные волны. При больших сверхзвуковых скоростях применимы крылья W-образной, M-образной и прямоугольной формы.

С помощью нашей трубы и весов мы можем изучить зависимость подъемной силы от площади и от угла атаки, изготовив из пластилина модели прямоугольного дозвукового крыла размерами 2×2 и 3×3 *см*. Установим модель на конце коромысла весов и уравновесим противовесом. Включим подачу воздуха и, передвигая грузик, определим подъемную силу: при равных углах атаки подъемные силы наших моделей будут относиться, как их площади, т. е. как 9 : 4.

Дозвуковое крыло испытывает подъемную силу даже при небольших отрицательных углах атаки (т. е. когда передняя кромка крыла расположена ниже задней). С увеличением угла между крылом и потоком подъемная сила и сила сопротивления растут; при $\varepsilon = 15-20°$ подъемная сила достигает наибольшей величины и затем быстро уменьшается; сила сопротивления продолжает расти. Летать выгодно на таких углах атаки, при которых подъемная сила велика, а сопротивление мало́.

Отношение подъемной силы к силе сопротивления называется аэродинамическим качеством или просто качеством машины. Качество бывает наибольшим при углах атаки 4—8°. Качество дозвукового крыла бывает тем больше, чем у́же и длиннее крыло. Такие крылья делают у планеров и самолетов с большой дальностью полета, как например у самолетов АНТ-25, на которых были совершены рекордные перелеты из Москвы в Америку. Если качество крыла равно, например, 20, то это значит, что сила, необходимая для продвижения крыла, в 20 раз меньше веса груза, который крыло может нести.

Подъемная сила возникает потому, что воздух, обдувающий крыло, отклоняется вниз (рис. 10). Стремясь по инерции двигаться в прежнем направлении, воздух действует на крыло с силой, направленной вверх. При этом воздух, обтекающий выпуклую верхнюю сторону дозвукового крыла, вынужден пройти больший путь, чем воздух, обтекающий его нижнюю поверхность. Поэтому скорость течения над крылом увеличивается, а давление уменьшается. Разность давлений над крылом и под крылом создает силу, направленную вверх. Изменение давления воздуха при обдуве крыла можно обнаружить, выведя на его поверхность манометрические трубки.

Сверхзвуковое крыло имеет тонкий профиль,

острую переднюю кромку и почти плоскую поверхность. При набегании сверхзвукового потока на нижнюю поверхность крыла, установленного под некоторым углом к потоку, возникают ударные волны, давление повышается и воздух отклоняется вниз (рис. 10). Повышение давления на нижней стороне крыла создает подъемную силу, направленную вверх.

Подъемную силу крыла можно выразить алгебраической формулой:

$$P = c_y S_{кр} \rho \frac{w^2}{2},$$

где ρ — плотность воздуха в технических единицах массы на *куб. м*, S — площадь крыла в *кв. м*, w — скорость в *м/сек*; c_y называется коэффициентом подъемной силы. Коэффициент подъемной силы дозвукового крыла можно заранее рассчитать по методу Жуковского или измерить путем продувок в аэродинамической трубе.

Для плоской пластинки, расположенной под углом ε к сверхзвуковому потоку, можно вывести соотношение:

$$c_y = 0{,}07 \frac{\varepsilon}{\sqrt{M^2 - 1}}.$$

M — число Маха для потока, набегающего на крыло (последняя формула справедлива только при $M > 1$).

Подъемная сила крыла должна уравновешивать вес летательной машины. Наименьшая скорость, при которой подъемная сила (при наибольшем c_y) становится равной весу, называется взлетной скоростью. Чем больше вес, приходящийся на единицу площади, или «нагрузка» на крыло, тем больше скорость полета, при котором машина может удерживаться в воздухе. С увеличением высоты плотность убывает. Для того чтобы подъемная сила могла преодолевать силу тяжести, скорость полета должна увеличиваться: летать выше — значит летать быстрее и дальше.

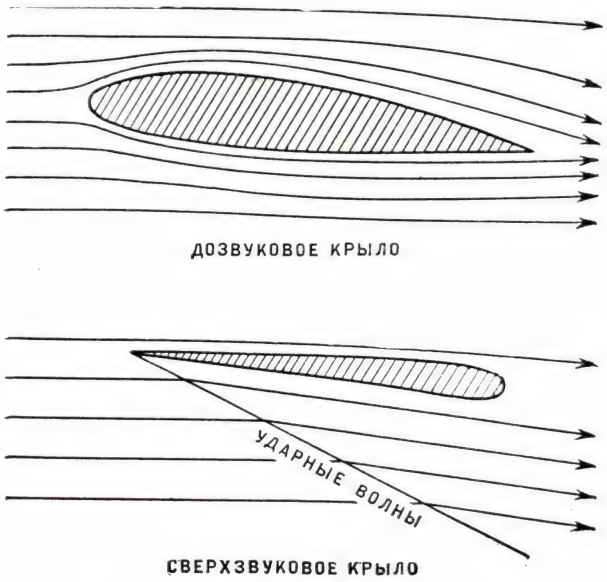


Рис. 10. Обтекание дозвуковых и сверхзвуковых крыльев.

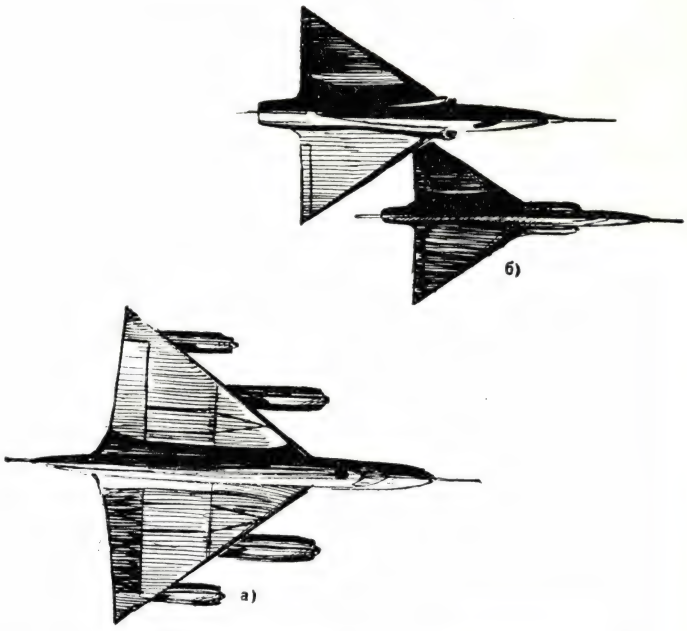


Рис. 11. Сверхзвуковые самолеты: а) бомбардировщик; б) истребители.

САМОЛЕТЫ

Самолетом называется летательная машина, основными частями которой являются крыло, двигатель, органы управления и посадочные приспособления (рис. 11, 12, 13). Дозвуковые самолеты, летающие при $M < 0{,}7$, приводятся в движение двигателями с воздушными винтами. Околозвуковые и сверхзвуковые самолеты, летающие при $M > 0{,}7$, приводятся в движение реактивными двигателями. Менее быстроходные винтовые самолеты до настоящего времени не вышли из употребления, так как они могут пролетать без посадки и без заправки горючим значительно дальше, чем реактивные. Кроме того, они имеют меньшую посадочную скорость, что особенно важно в районах, где нет больших, хорошо оборудованных аэродромов.

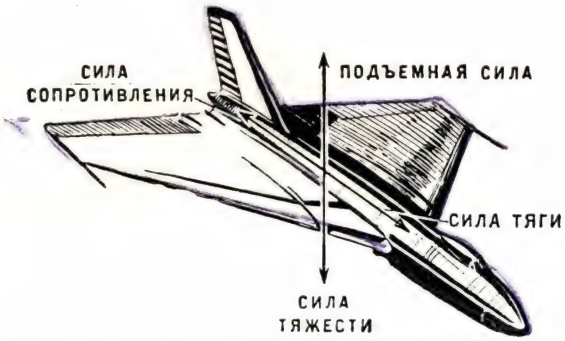


Рис. 12. Силы, действующие на самолет при горизонтальном полете.

Рис. 13. Органы управления самолетом.

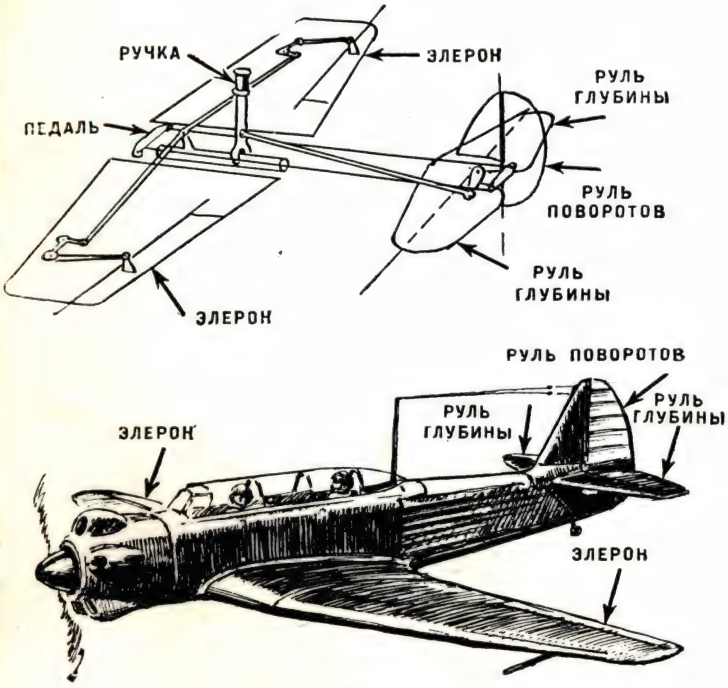


Рис. 14. Рычаги управления самолетом.

Силы, действующие на самолет при равномерном горизонтальном полете, изображены на рис. 12. Вес самолета при достаточной скорости полета уравновешивается подъемной силой крыла. Силы сопротивления, действующие на крыло и на отдельные части самолета, уравновешиваются силой тяги двигателя.

Самолет конструируется так, чтобы при полете он находился в состоянии устойчивого равновесия: если порыв ветра или какая-либо иная сила накренит самолет, подъемная сила опустившегося крыла станет больше, чем поднявшегося крыла (так как начинается скольжение на крыло), и вернет самолет в исходное положение. Если хвост самолета занесет в сторону, то на вертикальную плоскость—киль—воздух будет давить с силой, которая вернет самолет на прежний курс. Если хвост самолета задерется вверх, то на горизонтальную плоскость — стабилизатор — подействует сила, которая выправит машину (рис. 13).

Для управления полетом на самолете имеются подвижные плоскости — рули и элероны (рис. 13). Рули обычно располагаются на хвосте самолета. Руль поворотов служит продолжением киля; руль глубины служит продолжением стабилизатора. Элеронами называются подвижные плоскости на концах крыльев. Рули и элероны приводятся в движение педалями и ручкой, которые расположены перед сиденьем летчика (рис. 14). При помощи рулей и элеронов самолет совершает подъемы, развороты, спуски, петли и такие эволюции в воздухе, на которые не способны ни птицы, ни насекомые (рис. 16).

В з л е т. Летчик садится в кабину, задвигает колпак, застегивает предохранительный пояс и включает двигатель. Появляется сила тяги, которая заставляет самолет катиться по земле. Разбегаясь, самолет набирает скорость, подъемная сила крыла возрастает и, наконец, становится немного больше веса: самолет отрывается от летного поля. Скорость продолжает увеличиваться, летчик тянет ручку на себя: рули глубины поворачиваются, становясь к потоку под отрицательным углом атаки. Появляется снижающая сила, которая заставляет хвост самолета опуститься. Нос направляется кверху, и самолет начинает набирать высоту. Силы, действующие на самолет при наборе высоты, показаны на рис. 15, *а*. Обратите внимание, что при наборе высоты давление на крыло меньше веса, так как подъем происходит под действием равнодействующей силы тяги двигателя и давления на крыло.

Самолеты, у которых тяга двигателя больше веса, могут взлетать вертикально при нулевой подъемной силе крыла (рис. 35).

Горизонтальный полет. Набрав высоту, летчик перемещает ручку от себя и выравнивает машину. При этом нос самолета оказывается на линии горизонта. Силы, действующие на самолет при горизонтальном полете, показаны на рис. 12. Сила тяги при горизонтальном полете в несколько раз меньше веса. Отношение веса к силе тяги называется качеством самолета. Качество винтового пассажирского самолета достигает 10—15, реактивного — 4—7, сверхзвукового истребителя — 2—3.

Разворот (вираж). Для того чтобы повернуть тяжелую машину, летящую с большой скоростью, нужна большая центростремительная сила. Она создается соответствующим изменением направления подъемной силы крыльев. При правом повороте летчик накреняет машину направо, двигая ручку направо, и одновременно нажимает на правую педаль (рис. 14). Правый элерон поднимается, левый — опускается; возникает пара сил, которая заставляет самолет накрениться направо (рис. 15, *б*). Подъемная сила крыла направляется внутрь поворота: она-то и заставляет самолет пройти по кругу. Для того чтобы самолет не начал снижаться, нормальное давление на крыло должно возрасти так, чтобы вес уравновешивался его вертикальной составляющей. Для этого летчик либо увеличивает угол атаки, действуя рулями глубины, либо набирает скорость. В обоих случаях надо увеличить тягу, прибавив газ. При крутом вираже подъемная сила бывает в несколько раз больше веса. Крутой вираж с креном стал впервые выполнять русский летчик П. Н. Нестеров (1887—1914).

Перегрузки. Отношение действующей силы к весу называется перегрузкой: $П=\frac{F}{G}$.

Перегрузки возникают при изменении величины или направления скорости: при вираже, разгоне и при других эволюциях. Перегрузку испытывают и самолет, и летчик, и пассажиры. Чем круче вираж и чем больше скорость, тем больше перегрузка. При чрезмерной перегрузке самолет может развалиться в воздухе. Вредна перегрузка и для человека: кровь отливает от головы, внутренние органы стремятся разорвать соединительные ткани. При пятикратной перегрузке нетренированный человек может потерять сознание. Летчики скоростных самолетов укрепляют свой организм и тренируются, чтобы приучить себя к большим перегрузкам; Валерий Павлович Чкалов, как зарегистрировано самопишущими приборами, выдерживал девятикратную перегрузку.

Чем больше скорость, тем больше радиус виража, который можно выполнить, не превысив допустимую перегрузку. Так, например, при скорости 2500 *км/час* можно сделать разворот с радиусом не меньше 10 *км*. Беспилотные противозенитные крылатые торпеды (рис. 22) могут выдерживать бо́льшие перегрузки и выполнять более быстрые эволюции; поэтому пилотируемый самолет не может увернуться и спастись от самонаводящегося снаряда. При прямолинейном и равномерном полете П=1. В условиях невесомости П=0.

Высший пилотаж. Н. Е. Жуковский математически рассчитал, что, помимо взлета, горизонтального полета, разворотов и снижения, самолет способен выполнять различные эволюции в воздухе. Нестеров в России и Пегу́ во Франции почти в один и тот же день летом 1913 г. выполнили «мертвую петлю», открыв дорогу высшему пилотажу, который получил широкое развитие во время первой мировой войны. Нестеров первым из пилотов понял, что для крутого поворота необходим глубокий крен. «В воздухе везде опора»,— говорил он. Теперь самолеты летают и вертикально, и наклонно, и вверх колесами, выполняют бочки, штопоры, перевороты, карусель, горки, иммельманы и другие фигуры (рис. 16).

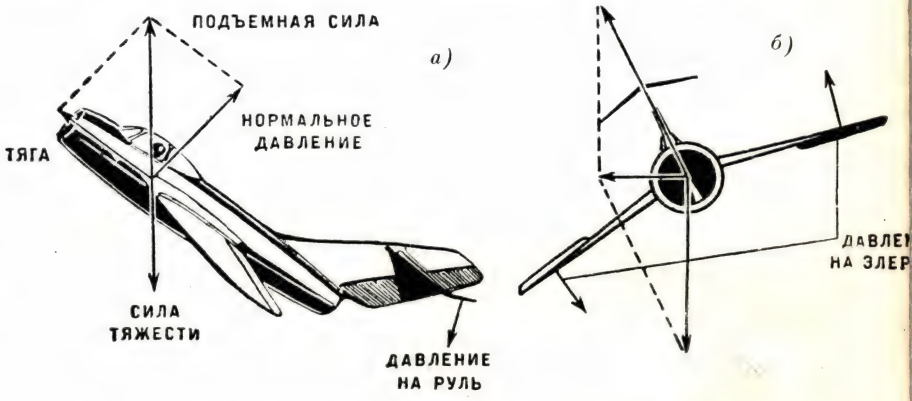


Рис. 15. Силы, действующие на самолет: а) при взлете, б) при вираже.

Мощность и скорость. Для того чтобы самолет летел быстрее, сила тяги и мощность двигателя должны увеличиваться. Если высота полета и угол атаки постоянны, то сила сопротивления растет прямо пропорционально квадрату скорости. Мощность двигателя, как известно из механики, равна произведению силы тяги на скорость. Следовательно, мощность, затрачиваемая на продвижение самолета, растет пропорционально кубу скорости. Если, например, на винтомоторном истребителе начала второй мировой войны, летавшем со скоростью около M=0,5, был двигатель мощностью порядка 1000 *л. с.*, то для того, чтобы при постоянном c_x скорость возросла вдвое и стала равна скорости звука, потребовалась бы мощность $1000 \cdot 2^3 = 8000$ *л. с.*, а для полета с двойной скоростью звука — мощность $1000\left(\frac{2}{0,5}\right)^3 = 64\,000$ *л. с.* Такой поршневой двигатель весил бы более 30 *Т*.

Винтовые двигатели при околозвуковых скоростях становятся непригодными, так как благодаря звуковому барьеру сопротивление, испытываемое лопастями пропеллера, резко возрастает, а его к. п. д. падает: работа двигателя почти целиком затрачивается на то, чтобы вращать винт, а не на то, чтобы тянуть самолет. Поэтому винтовые самолеты никогда не достигали скорости 800 *км/час*; на более быстроходных машинах применяются только реактивные двигатели.

К счастью, мощность, потребная для полета, растет так быстро со скоростью только при постоянной высоте полета. Но при увеличении скорости возрастает и подъемная сила. Для того чтобы она не стала больше веса, летчик либо уменьшает угол атаки (при этом качество самолета ухудшается), либо поднимается в такие разреженные слои атмосферы, где, несмотря на рост скорости, подъемная сила равна весу. Качество самолета остается прежним, следовательно, и потребная тяга не меняется. При постоянной тяге (но при переменной высоте полета) потребная мощность растет прямо пропорционально первой степени скорости. На сверхзвуковых истребителях устанавливаются реактивные двигатели с тягой в 5000—10 000 *кГ*, которые при M=2 развивают мощность, превосходящую мощность машин большого океанского парохода, хотя вес подобных авиационных двигателей составляет всего 1,5—3 *Т*.

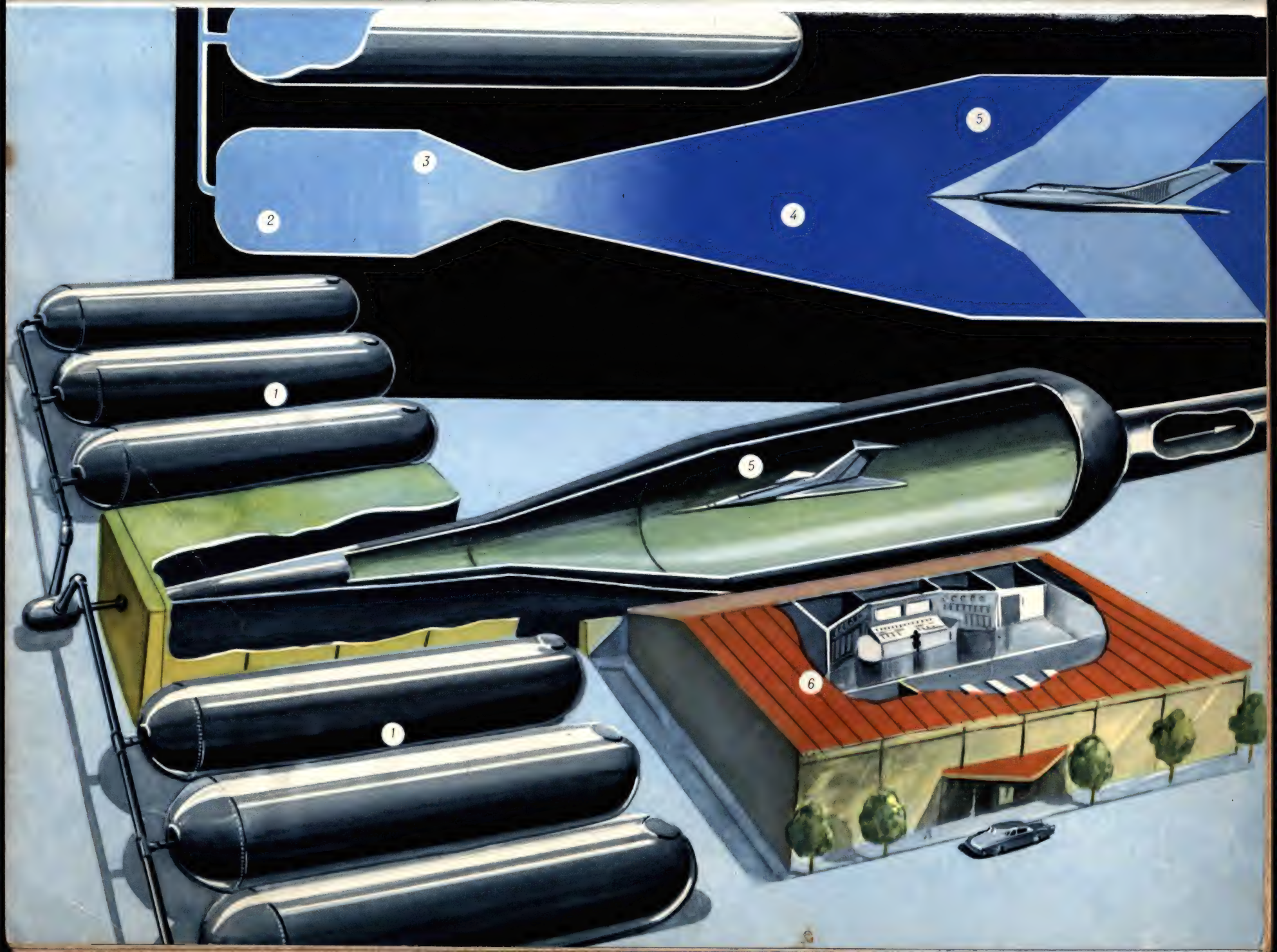
Сверхзвуковые полеты. Самолеты с реактивными двигателями легко преодолевают звуковой барьер и летают гораздо быстрее звука: скорость серийных самолетов приближается к M=3; потолок превосходит 28 *км*. Проектируются самолеты, которые должны летать еще выше и со скоростями до M=10. На пути к созданию таких летательных машин придется преодолеть ряд трудностей, связанных с нагревом самолета и двигателя при торможении набегающего воздуха. Летящие за пределами атмосферы баллистические ракеты не знают этого препятствия.

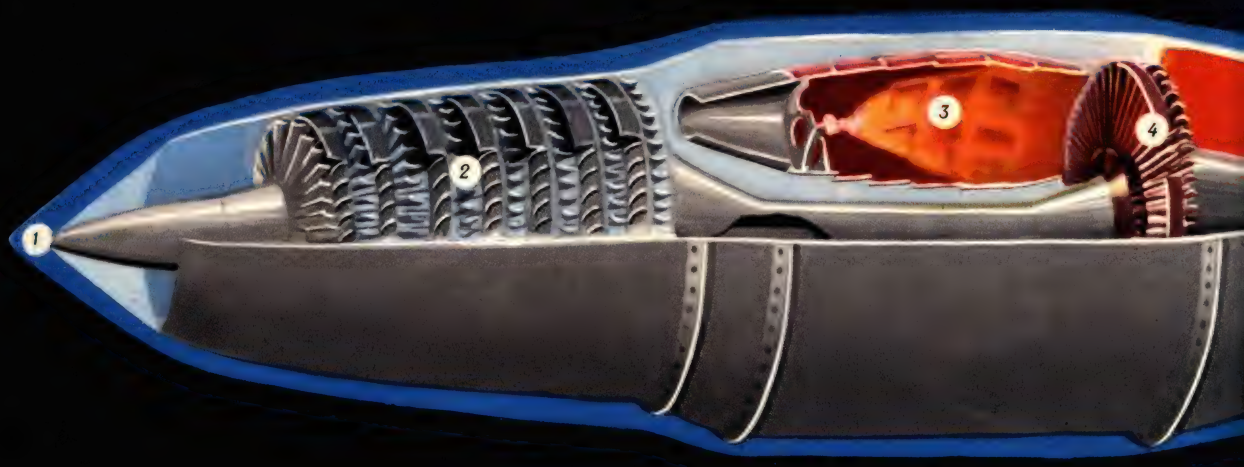
При полете на сверхзвуковых самолетах наблюдается много интересных явлений. Можно ли догнать вчерашний день? На скоростном самолете — можно. Действительно, окружная скорость Земли на широте Москвы равна $465 \cdot \cos 56° = 260$ *м/сек* = 935 *км/час*. Такую скорость может развивать пассажирский реактивный самолет ТУ-104. Начав полет прямо на запад во время заката, летчик и пассажиры все время будут видеть перед собой заходящее Солнце, сколько бы полет ни продолжался, так как самолет, летящий в западном направлении с такой же скоростью, с которой вращается Земля, будет неподвижен относительно Солнца.

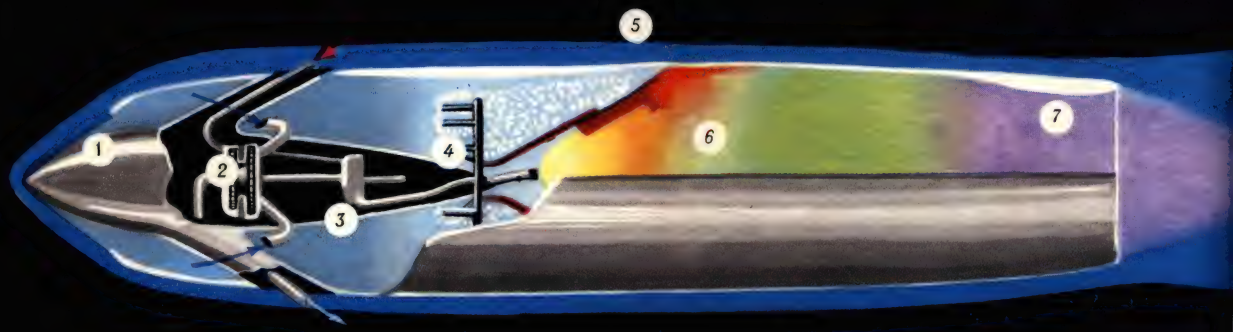
На реактивном самолете, пролетающем 2500 *км* в час, можно перегнать Солнце: вылетев на запад после захода, летчик и пассажиры через некоторое время увидят новый восход, но не на востоке, а на западе: они догонят Солнце, скрывшееся за горизонтом. Если полет начался, скажем, 17 марта в 3 часа

Таблица 10. Аэродинамическая труба: *1.* Газгольдеры. *2.* Ресивер. *3.* Дозвуковое течение. *4.* Сверхзвуковое течение. *5.* Рабочая камера. *6.* Помещение для наблюдателей.

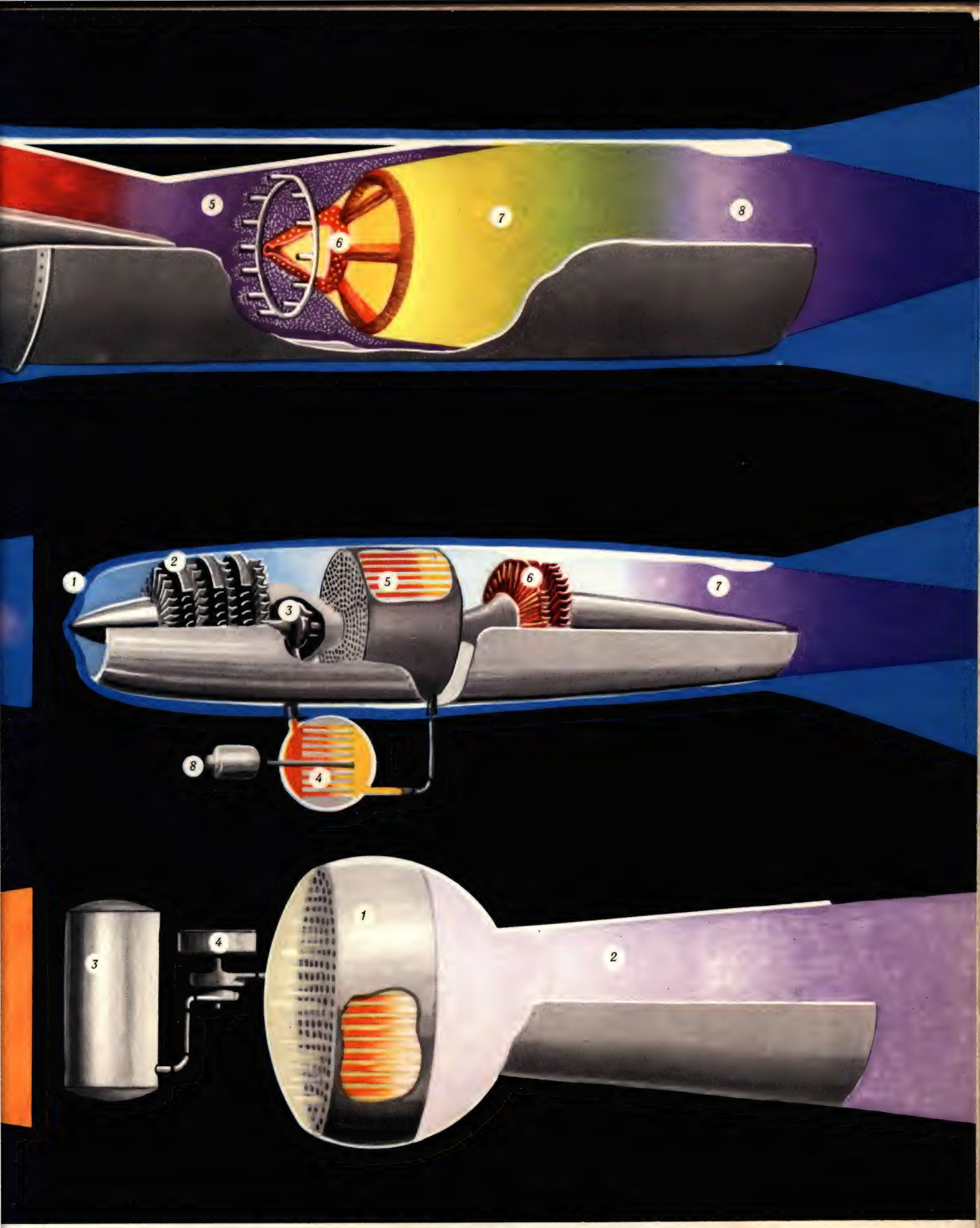
Таблица 11. Различные виды авиационных двигателей. Вверху — турбореактивный двигатель с форсажной камерой: *1.* Воздухозаборник. *2.* Компрессор. *3.* Камера сгорания. *4.* Турбина. *5.* Форсунки. *6.* Стабилизатор. *7.* Форсажная камера. *8.* Сопло. Во втором ряду слева — прямоточный воздушный реактивный двигатель: *1.* Воздухозаборник. *2.* Воздушная трубка. *3.* Насос. *4.* Топливные форсунки. *5.* Стабилизатор. *6.* Камера сгорания. *7.* Сопло. Во втором ряду справа — ядерный турбореактивный двигатель: *1.* Воздухозаборник. *2.* Компрессор. *3.* Насос. *4.* Ядерный реактор. *5.* Теплообменник. *6.* Турбина. *7.* Сопло. *8.* Регулирующий стержень. В нижнем ряду слева — жидкостный ракетный двигатель на молекулярном горючем: *1.* Камера сгорания. *2.* Форсунки. *3.* Сопло. *4.* Бак для горючего. *5.* Бак для окислителя. *6.* Насосы. В нижнем ряду справа — жидкостный ракетный двигатель на ядерном горючем: *1.* Реактор. *2.* Сопло. *3.* Бак для рабочего вещества. *4.* Насосы.


1
2
3
4
5
5
1
6


1
2
3
4


1
2
3
4
5
6
7

1
2
3
4
5
6


5
6
7
8
1
2
3
4
5
6
7
8
1
2
3
4

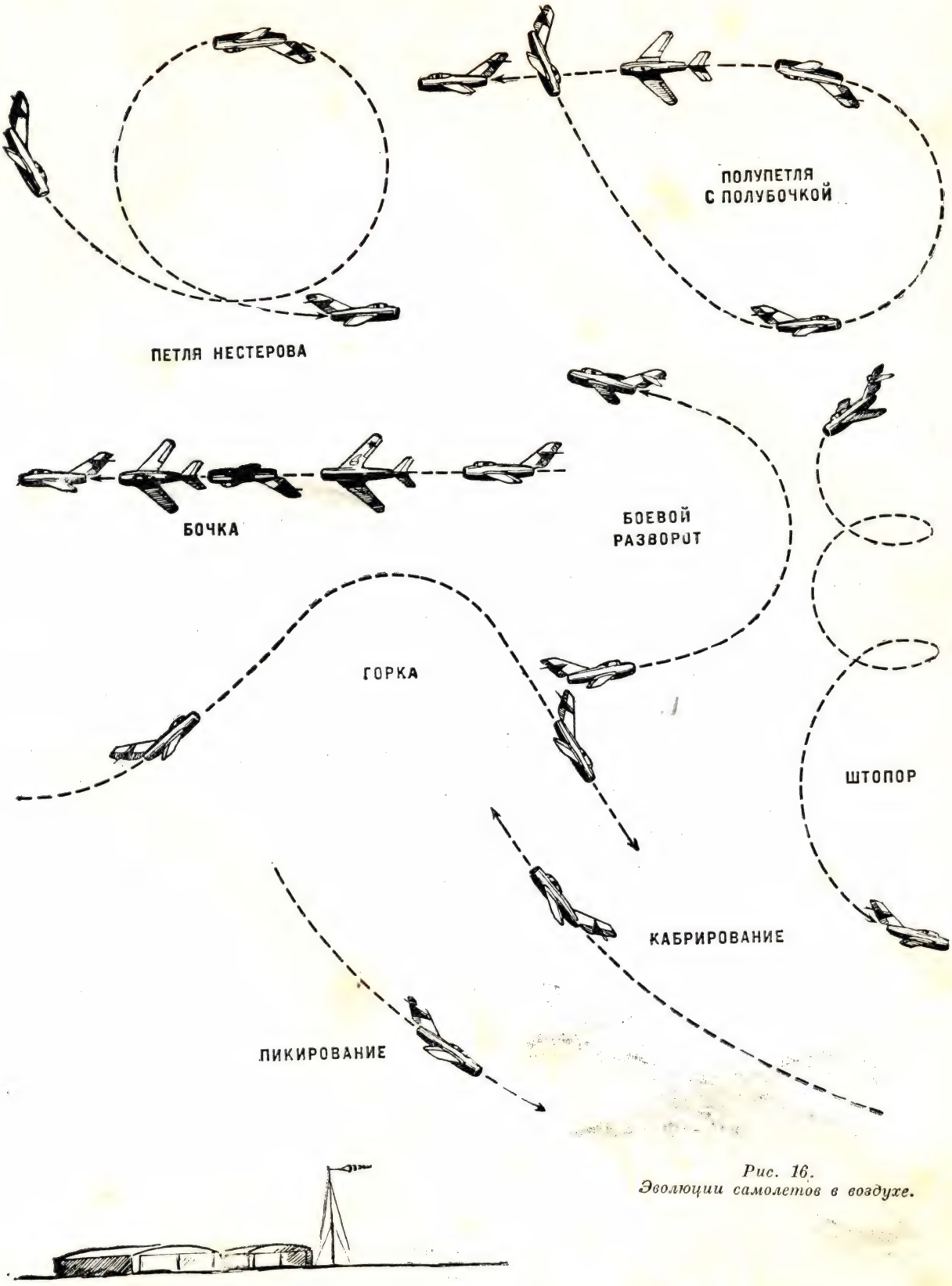


Рис. 16.
Эволюции самолетов в воздухе.

Таблица 12. Гиперзвуковой самолет ближайшего будущего.

утра в Москве, то через три часа он окончится в Америке, но не сегодня и не завтра, а *вчера* — 16 марта в 11 часов вечера. Действительно, восточноамериканское время на 7 часов отстает от московского. Поэтому в начале нашего перелета в Америке было еще 16 марта, 8 часов вечера. Полет продолжается три часа; он окончится 16 марта в 11 часов по местному времени. Начав обратный перелет вечером следующего дня — в 18 часов 17 марта, самолет через три часа приземлится в Москве, но там уже будет пятый час утра 18 марта.

Скорость пассажирских самолетов едва ли целесообразно увеличивать более чем до 2000—2500 *км/час*, так как уже тогда они за четыре-пять часов смогут прилетать в любой пункт Азии, Африки или Америки, а перелет в Австралию займет менее 8 часов. Самое далекое путешествие будет недостаточно долгим, чтобы пассажир успел так же хорошо выспаться, как в курьерском поезде на линии Москва — Ленинград. Дальнейший рост скорости, не принося практической пользы, будет сопряжен с затруднениями, вызванными сложностью посадки, и с динамическим нагревом в полете.

П о с а д к а является одной из самых трудных частей полета, особенно на сверхзвуковых самолетах. Летчик дает ручку от себя и переводит самолет на снижение. Перед самой землей, сбавив газ, он берет ручку на себя: угол атаки возрастает, сопротивление увеличивается, и самолет, быстро потеряв скорость, а с ней и подъемную силу, «проваливается» и касается поверхности лётного поля. После того как кинетическая энергия самолета израсходуется на трение в тормозах, машина останавливается: полет окончен. Посадочная скорость, которую самолет имеет перед приземлением, даже у учебных машин бывает не менее 50 *км/час*. Чем больше максимальная скорость самолета, тем больше и его посадочная скорость. Если не принять особых мер, то посадочная скорость сверхзвуковых машин будет так велика, что совершить посадку окажется невозможным. Для снижения посадочной скорости скоростные самолеты снабжаются механизированными крыльями с подвижными закрылками и предкрылками, благодаря которым в момент посадки подъемная сила крыла существенно возрастает, а посадочная скорость снижается. Все же она остается очень большой: порядка 200 *км/час* — больше предельной скорости автомобиля ЗИЛ-110. Чтобы не разбить машину, летчик должен обладать большим мастерством. Посадить сверхзвуковой самолет можно только на бетонированную дорожку, и после того, как израсходуется горючее, так что вес машины станет гораздо меньше, чем был при взлете.

П р е д е л ь н а я в ы с о т а п о л е т а, или п о т о л о к, самолета тем выше, чем больше скорость, но с увеличением скорости растет мощность, потребная для продвижения. Поэтому потолок определяется той предельной мощностью, которую способен развивать двигатель при работе на высоте. Наибольшая высота, достигнутая советским самолетом Т-431 с турбореактивным двигателем, равна 28 760 *м*. Самолеты с ЖРД при некоторых полетах поднимались выше 38 *км*. Самолет с ЖРД укрепляется на самолете-матке; на высоте порядка 9 *км* он отцепляется и продолжает полет самостоятельно, набирая высоту и скорость (рис. 17). Разрабатывается самолет, который будет способен достичь высоты в сотни километров, планируя облететь кругом земного шара и совершить посадку.

На высоте более 7 *км* плотность атмосферы становится такой малой, что воздуха не хватает для дыхания: наступает кислородное голодание, или «горная болезнь». Поэтому пассажирские самолеты и некоторые военные машины, предназначенные для полетов в стратосфере (стратопланы), имеют герметические кабины, куда нагнетается кондиционированный воздух заданной температуры, плотности и влажности. При любой высоте полета давление в кабине стратоплана не падает ниже половины атмосферного, так что кислородного голодания не ощущается. При высотных полетах в негерметических кабинах применяются специальные костюмы со шлемами, защищающие пилота от понижения давления, от кислород-

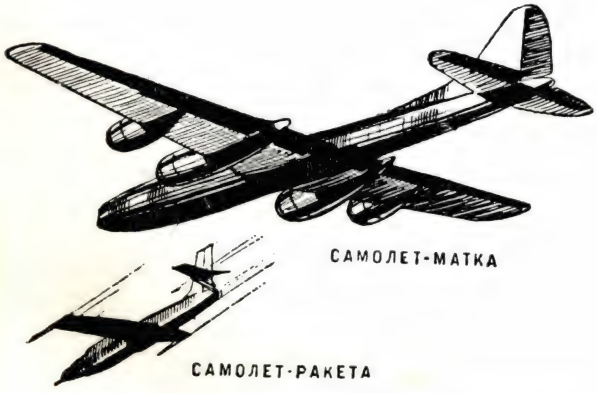


Рис. 17. Отделение самолета-ракеты от авиаматки.

Рис. 18. Скафандр для высотных полетов.

ного голодания и от теплового излучения стенок машины (рис. 18).

При достаточном увеличении скорости сверхзвуковое крыло способно нести самолет на очень большой высоте: расчеты показывают, что при M=10 высота полета может достигать 50 *км*. Такие самолеты пригодны только для военных целей. Пассажирские самолеты, имеющие скорость M=2—2,5, будут летать на высотах порядка 20 *км*.

Гиперзвуковые самолеты. В настоящее время ведущими авиационными институтами разрабатываются гиперзвуковые самолеты, предназначенные для полетов при $M > 6$. Ударные волны, образующиеся при гиперзвуковом обтекании крыла и фюзеляжа, взаимодействуют друг с другом — интерферируют. (Подробнее о явлении интерференции волн рассказывается в статье «Свет и его применение» в этом же томе ДЭ.) При неблагоприятной интерференции волновое сопротивление может возрасти вдвое. Наоборот, при удачном сочетании крыла и фюзеляжа или путем применения дополнительных поверхностей можно добиться того, чтобы ударные волны гасили друг друга: теоретически волновое сопротивление можно свести к нулю. Внешний вид одного из возможных вариантов такого самолета показан на цветной таблице (стр. 305).

Для снижения волнового сопротивления выгодно располагать фюзеляж под крылом или подвешивать один самолет под другим. В этом случае маленький самолет располагается на таком расстоянии от большого самолета-матки, что взаимодействие воздушных потоков сведет волновое сопротивление к наименьшей величине. Самолет-матка снабжается турбореактивными двигателями. На дочернем самолете, несущем полезный груз, устанавливаются ЖРД или прямоточные двигатели. Достигнув заданной высоты и скорости, дочерний самолет отцепляется и продолжает гиперзвуковой полет самостоятельно, а самолет-матка возвращается на базу.

Из истории авиации. Попытки построить летательную машину, которая дала бы человеку возможность летать, подобно птицам, делались на всем протяжении истории человечества. Но до тех пор, пока не было создано соответствующего двигателя, эти попытки были обречены на неудачу, так как мускульной энергии человека недостаточно для полета. Построить самолет стало возможным только после изобретения легкой тепловой машины. В 1881 г. капитан Российского военно-морского флота А. Ф. Можайский, проведя успешные опыты с летающими моделями, получил «привилегию» на изобретенный им самолет с плоским прямоугольным крылом и фюзеляжем в виде очень легкой лодки, приводимый в движение сконструированной Можайским паровой машиной с воздушными винтами. На этом самолете имелись рули, колесное шасси и некоторые другие устройства, применяемые и на современных самолетах. Преодолев многочисленные денежные и организационные затруднения, изобретатель, работавший в обстановке враждебного недоверия со стороны чиновников царского правительства, построил свою машину. К сожалению, достоверных сведений о его полетах не сохранилось.

Несколькими годами позже немецкий инженер Лилиенталь проделал ряд скользящих полетов на построенном им балансирном планере, который управлялся перемещением центра тяжести тела пилота. Во время одного из таких полетов планер потерял устойчивость и Лилиенталь погиб. В 1901 г. американские механики братья Райт построили планер из бамбука и полотна и проделали на нем ряд удачных полетов. Планер запускался с пологого склона холма при помощи примитивной катапульты, состоявшей из небольшой бревенчатой вышки с блоком и веревки с грузом. Летом братья учились летать, а остальное время работали в своей велосипедной мастерской, копя деньги для продолжения опытов. Зимой 1902—1903 гг. они изготовили бензиновый двигатель внутреннего сгорания, установили его на своем планере и 17 декабря 1903 г. совершили первые удачные полеты, самый долгий из которых хотя и продолжался только 59 секунд, все же показал, что самолет способен взлетать и держаться в воздухе.

Усовершенствовав самолет и достигнув некоторого летного мастерства, братья Райт в 1906 г. обнародовали свое изобретение. С этого момента началось бурное развитие авиации во многих странах мира. Через три года французский инженер Блерио, перелетев на самолете своей конструкции через Ла-Манш, доказал

способность сухопутной машины летать над морем. Менее чем через двадцать лет на одноместном сухопутном самолете был совершен перелет из Америки в Европу через Атлантический океан, а еще через десять лет, летом 1937 г., трое советских летчиков — В. П. Чкалов, Г. Ф. Байдуков и А. В. Беляков — на самолете А. Н. Туполева АНТ-25 перелетели из Москвы в Америку через Северный полюс. Через несколько дней М. М. Громов, А. Б. Юмашев и С. А. Данилин, пролетев тем же маршрутом, установили мировой рекорд дальности полета по прямой, покрыв без посадки 10 300 *км*.

Наряду с дальностью росла грузоподъемность, высотность и скорость самолетов. Первый сверхтяжелый самолет был построен в России. Этот четырехмоторный гигант «Илья Муромец» настолько превосходил все тогдашние машины, что за рубежом долго не могли поверить в существование такого самолета. В 1913 г. «Илья Муромец» побил мировые рекорды дальности, высотности и грузоподъемности.

Скорость самолета братьев Райт лишь немного превосходила 50 *км/час*. За первое десятилетие ее удалось увеличить вчетверо: рекорд скорости 1913 г. достиг 203 *км/час*. За следующие десять лет рекордная скорость увеличилась еще вдвое, превысив 400 *км/час*. Еще за десять лет скорость возросла на 75%, достигнув в 1933 г. 709 *км/час*. За последующие годы винтомоторные самолеты вплотную подошли к пределу своих возможностей: в 1940 г. рекордная скорость достигла 752 *км/час*. Этой цифры винтомоторные самолеты не превзошли до наших дней.

Подобное явление происходило и с ростом высоты: подняться выше 18 *км* на винтомоторном самолете с поршневым двигателем оказалось невозможным. Резкого увеличения скорости и высоты удалось достичь, перейдя от винтомоторных самолетов к реактивным. Неизбежность этого перехода предвидел Циолковский, который писал, что за эрой самолетов винтовых последует эра самолетов реактивных.

Реактивные самолеты появились в 1939 г. Первый полет на реактивном самолете в СССР был совершен летчиком-испытателем В. К. Федоровым в 1940 г. Осенью 1945 г. на английском реактивном самолете был установлен рекорд скорости превысивший 950 *км/час*. Современные реактивные самолеты поднимаются на высоту почти в 40 *км* и развивают скорость, превосходящую 3000 *км/час*.

Существующие реактивные самолеты еще очень далеки от предела своих возможностей: в 1958 г. они летали лишь немногим быстрее утроенной скорости звука. Но, как говорилось выше, уже проектируется самолет, который должен летать на высоте до 50 *км* со скоростью M=10.

Н. Е. Жуковский и его школа. Выдающиеся достижения авиации были подготовлены работами ученых, создавших авиационную науку. Ведущее место среди них занимает Николай Егорович Жуковский (184 —1921), которого В. И. Ленин называл отцом русской авиации. Жуковский разработал теорию, дающую возможность рассчитать подъемную силу и определить наивыгоднейшую форму профиля дозвукового крыла, решил задачу о работе гребного винта, создал основы расчета самолета, разработал способы аэродинамических исследований. Стремясь к тому, «чтобы средства наших аэродинамических лабораторий стали в соответствие с могуществом нашей Родины», он организовал первые лаборатории, оснащенные аэродинамическими установками и совершенными приборами для научных исследований. Теперь мечта Жуковского полностью осуществилась: созданная им лаборатория развилась во всемирно известный Аэрогидродинамический институт — ЦАГИ. На основе организованного Жуковским в 1919 г. Института инженеров воздушного флота в нашей стране вырос ряд авиационных институтов в Москве, Ленинграде, Харькове и в других городах. Жуковским были написаны сотни научных работ, особое место среди которых занимает вышедшая в 1912 г. книга «Теоретические основы воздухоплавания». Он сумел передать свои знания, опыт и творческую энергию многим ученикам и товарищам. Из их числа вышел ряд выдающихся ученых: академики С. А. Чаплыгин, В. П. Ветчинкин, Б. С. Стечкин, А. Н. Туполев, Б. Н. Юрьев и другие.

АВИАЦИОННЫЕ ДВИГАТЕЛИ

Принцип действия двигателя. Авиационный двигатель служит для создания силы тяги. Из физики известно, что силы возникают только при взаимодействии тел. Сила тяги возникает при взаимодействии двигателя с окружающим воздухом. По третьему закону Ньютона, сила, с которой двигатель действует на отбрасываемый воздух, равна силе тяги, с которой воздух давит на двигатель. Эта сила, по второму закону Ньютона, равна ежесекундному приросту количества движения. Если, например, двигатель отбрасывает

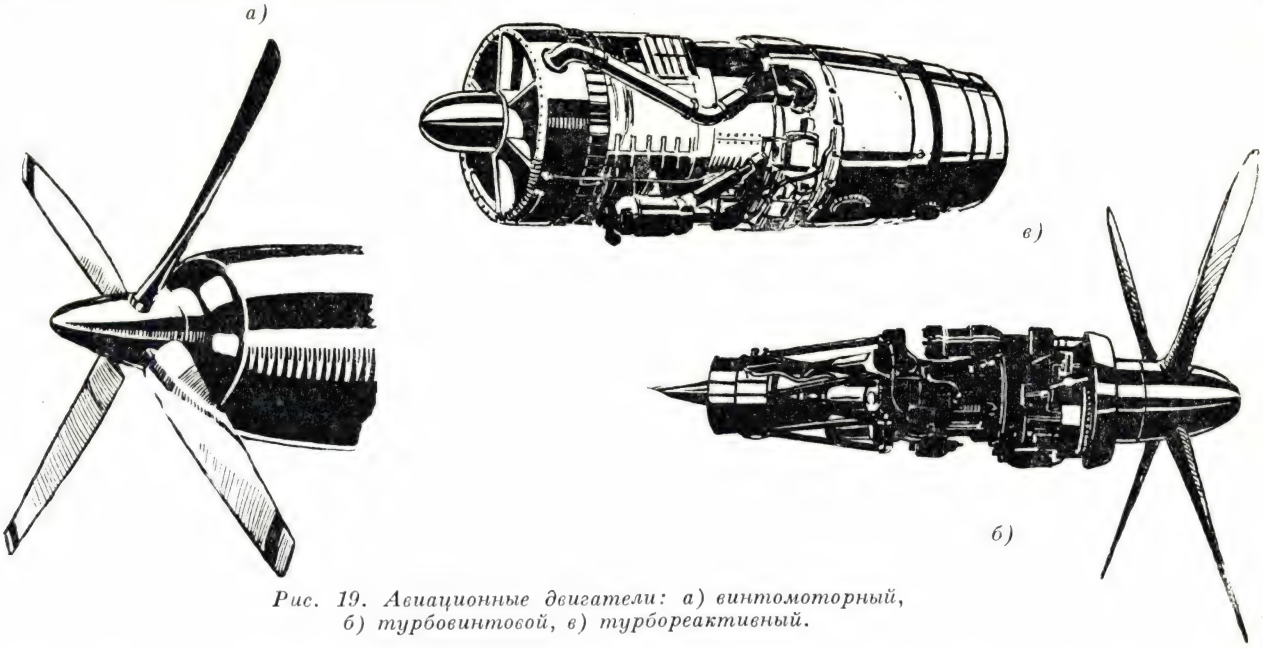


Рис. 19. Авиационные двигатели: а) винтомоторный, б) турбовинтовой, в) турбореактивный.

100 *кг*, или 10,2 технической единицы массы, газа в секунду со скоростью 550 *м/сек*, а скорость набегающего потока, равная скорости полета,— 250 *м/сек*, то сила тяги будет составлять:

$$10{,}2(550-250)=3060 \text{ кГ}.$$

Сила тяги равна произведению массы, отбрасываемой ежесекундно $m=\frac{G}{g}$, на прирост скорости Δw:

$$R=\frac{G\Delta w}{g}.$$

Масса, отбрасываемая ежесекундно, называется расходом G. Расход измеряется в килограммах в секунду. Делитель g переводит килограммы в технические единицы массы.

Существует несколько различных видов авиационных двигателей (рис. 19): поршневые двигатели с воздушными винтами (рис. 19, *а*), газотурбинные винтовые двигатели (сокращенно ТВД, рис. 19, *б*), турбореактивные двигатели (ТРД, рис. 19, *в* и цв. табл. на стр. 304), прямоточные воздушно-реактивные двигатели (ПВРД) и ракетные двигатели (цв. табл. на стр. 304). Все эти двигатели, за исключением поршневых, могут работать как на химическом, так и на ядерном горючем. Двигатель преобразует энергию горючего в работу продвижения самолета.

Воздушный винт. Наиболее экономичным «движителем» для самолетов, летящих медленнее $\frac{2}{3}$ скорости звука, является воздушный винт, или пропеллер (рис. 19, *а* и *б*). Существуют двух-, трех- и даже четырехлопастные винты. Каждая лопасть винта представляет собой небольшое крыло, располагаемое к набегающему воздуху под наивыгоднейшим углом атаки. Отдельные точки лопасти вращающегося винта на летящем самолете движутся относительно набегающего воздуха по винтовым линиям. На рис. 20 видно, что чем дальше расположен рассматриваемый участок лопасти от оси, тем более пологую линию он описывает относительно набегающего воздуха. Для того чтобы все участки лопасти встре-

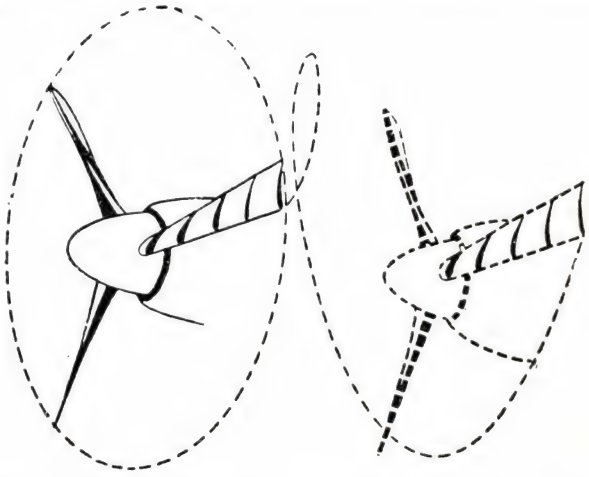


Рис. 20. Угол установки лопастей воздушного винта уменьшается с удалением от оси.

чали набегающий воздух под наивыгоднейшим углом атаки, угол установки лопасти (т. е. угол между лопастью и плоскостью вращения) должен уменьшаться по мере удаления от оси.

На движущуюся лопасть, так же как и на движущееся крыло, действуют со стороны воздуха сила сопротивления (которую преодолевает двигатель) и сила нормального давления, являющаяся полезной тягой винта. С увеличением скорости полета винтовые линии, описываемые отдельными точками лопастей, становятся более крутыми, угол атаки уменьшается, а вместе с ним убывает и сила тяги. Для того чтобы тяга винта не убывала со скоростью, применяют винты с поворотными лопастями: при увеличении скорости полета лопасти автоматически поворачиваются, так что угол атаки остается наивыгоднейшим. При приближении относительной скорости лопасти к звуковой величине возникает сила волнового сопротивления; к.п.д. винта падает, так что при $M \approx 1$ он становится непригодным для продвижения самолета. Для вращения винтов применяются поршневые и газотурбинные двигатели.

Теория винта была разработана Н. Е. Жуковским и В. П. Ветчинкиным и развита английским ученым Глауэртом.

Поршневые двигатели, или моторы (рис. 19, *а*) были единственными двигателями, применявшимися в авиации в течение первых сорока лет ее существования. Поршневые авиадвигатели внутреннего сгорания работают по четырехтактному циклу, подобно двигателям автомобилей и тракторов. Отличительной особенностью авиадвигателей является их малый вес и большая мощность: авиамотор, развивающий 2000 *л. с.*, весит около 1200 *кГ*; вес, приходящийся на каждую лошадиную силу, или его «удельный вес», составляет всего 0,6 *кГ/л. с.* (лошадь весит около 300 *кГ*).

Малый удельный вес достигается тем, что для изготовления авиамоторов применяются сплавы, сочетающие наибольшую прочность с наименьшим весом, и, кроме того, размеры каждой части двигателя делаются такими малыми, чтобы действующие силы были близки к предельно допустимой величине. При небольшом износе двигатель становится непригодным, так как его прочность оказывается недостаточной. Поэтому срок работы мотора не превышает нескольких сотен часов.

Поршневые авиадвигатели достаточно экономичны: они потребляют всего 0,19—0,24 *кГ* бензина в час на каждую лошадиную силу.

Турбовинтовые двигатели (ТВД, рис. 19, *б*) развивают еще большую мощность и имеют еще меньший вес, чем поршневые. ТВД состоит из воздухозаборника, компрессора, нагревателя, турбины и выходного сопла. Всасываемый воздух поступает в компрессор, где его давление повышается в 8—15 раз, и проходит в нагреватель. Там его внутренняя энергия и температура возрастают еще в 2—3 раза. У существующих в настоящее время ТВД на химическом горючем нагревателем служит камера сгорания; у разрабатываемых двигателей, использующих ядерную энергию, нагревателем служит теплообменник, состоящий из тонких трубок для протекания воздуха, омываемых расплавленным металлом (например, натрием), нагретым до 900—1000° в ядерном реакторе. Сжатый и горячий воздух протекает через турбину и отдает свою энергию ее рабочему колесу, которое приходит в быстрое вращение. Примерно половина энергии, полученной турбиной, расходуется на вращение компрессора; другая половина идет на вращение воздушного винта. ТВД, работающие на химическом горючем, начали применяться в конце 40-х годов. Двигатель, развивающий мощность в 5000 *л. с.*, весит менее 2000 *кГ*, он потребляет 0,2—0,3 *кГ* горючего в час на лошадиную силу. Советские турбовинтовые двигатели конструкции Н. Д. Кузнецова установлены на самолетах «ТУ-114», «АН-10», «ИЛ-18» и др. Турбовинтовые самолеты летают со скоростями 600—800 *км/час*. Советский военный самолет без посадки и без заправки горючим в воздухе в июле 1959 г. за 22 часа пролетел расстояние более 17 тыс. *км*.

Турбореактивные двигатели (ТРД, рис. 19, *в* и цв. табл. на стр. 304) состоят из воздухозаборника, компрессора, нагревателя, турбины и реактивного сопла. Воздух, протекая по воздухозаборнику, частично затормаживается, при этом его давление и температура возрастают тем больше, чем больше была начальная скорость. В компрессоре давление воздуха увеличивается еще в несколько раз. В нагревателе сжатый воздух нагревается до такой температуры, которую только способны выдержать лопатки турбины. Сжатый и нагретый газ отдает рабочему колесу турбины примерно половину своей «свободной» энергии. Оставшаяся половина при протекании по реактивному соплу превращается в кинетическую энергию струи. В итоге количество движения газа возрастает и появляется реактивная тяга. Для еще большего увеличения тяги

между турбиной и соплом устраивается форсажная камера, где при дожигании горючего температура возрастает до 2000—2500°, т. е. до значительно большей величины, чем способны выдерживать лопатки турбины.

ТРД еще легче, чем турбовинтовые двигатели: турбореактивный двигатель с тягой 5000 *кГ* весит менее 1500 *кГ*; при скорости, равной скорости звука, он развивает полезную мощность более 20 000 *л. с.*; его «удельный вес» — менее 75 *Г* на лошадиную силу.

При скорости, большей 800 *км/час*, ТРД становится экономичнее, чем ТВД, так как с ростом скорости работа винта ухудшается.

Экономичность ТРД характеризуется удельным расходом горючего. Удельный расход равен расходу горючего в килограммах в час на каждый килограмм тяги R:

$$Ce=\frac{G}{R}.$$

Удельный расход зависит от скорости полета: при работе на месте он равен около 0,8 *кГ* в час на 1 *кГ* тяги. С увеличением скорости Ce растет, поэтому применять ТРД при $M>3{,}0$ становится невыгодно.

Прямоточные воздушно-реактивные двигатели (ПВРД, цв. табл. на стр. 304) приходят на смену турбореактивным при $M>3$. Если скорость велика, то повышение давления в воздухозаборнике становится таким большим, что компрессор, а вместе с ним и турбина оказываются излишними: все движущиеся части исчезают, остается воздухозаборник, нагреватель и реактивное сопло. В сверхзвуковом воздухозаборнике устанавливается остроконечное тело, похожее на носок снаряда, при набегании на которое возникают косые ударные волны; это сделано для уменьшения потерь энергии при торможении потока.

Воздух, сжатый в воздухозаборнике и подогретый в нагревателе, с возросшей скоростью вытекает из реактивного сопла, создавая силу тяги, равную ежесекундному приросту количества движения. ПВРД могут применяться при скоростях от $M=0{,}7$ до $M=10$ (а может быть, и еще больше). Ясно, что неподвижный воздух в ПВРД не потечет; поэтому, чтобы запустить такие двигатели, самолет надо предварительно разогнать при помощи ТРД или ракеты.

Снабженная ПВРД летающая мишень, изображенная на рис. 21, сбрасывается на большой высоте с самолета-матки. Крылатые противозенитные ракеты (рис. 22) запускаются с помощью стартовой пороховой ракеты. ПВРД

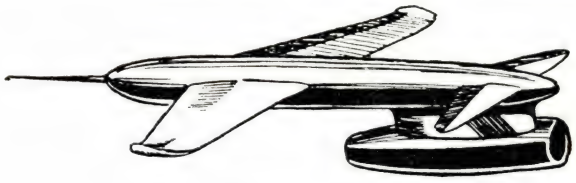


Рис. 21. Летающая мишень.

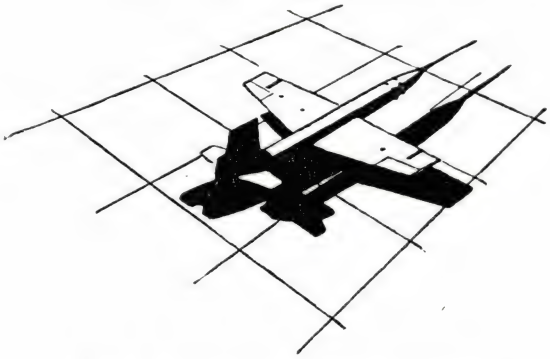


Рис. 22. Противозенитная ракета.

являются единственными двигателями, пригодными для гиперзвуковых полетов в атмосфере при $M=4$—10. При $M>3$ ПВРД потребляют меньше горючего и обладают меньшим весом, чем ТРД. Первые в мире ПВРД были построены в СССР И. А. Меркуловым и испытаны в качестве вспомогательных двигателей на истребителе системы Поликарпова летчиком П. Е. Логиновым в 1939 г.

Винтовые турбореактивные и прямоточные двигатели могут действовать только в пределах земной атмосферы. Для полетов в межпланетном пространстве, а также для разгона самолетов служат ракетные двигатели.

Ракетные двигатели (РД) работают независимо от окружающей атмосферы, так как они несут с собой все, что необходимо для создания силы тяги: горючее и окислитель или (в атомных двигателях) рабочее вещество. Существуют пороховые ракетные двигатели — ПРД и жидкостные ракетные двигатели — ЖРД; разрабатываются ракеты на ядерном горючем. Ракеты — самые древние и в то же время самые современные тепловые машины. Они были изобретены в Китае много веков назад. Ракеты применялись на празднествах в качестве увеселительных огней и на войне для поджигания вражеских городов. Теперь они широко применяются для научно-исследовательских целей. Советские искусственные спутники Земли были запущены с помощью огромных

баллистических ракет. Еще более мощными были первые в мире советские космические ракеты. При помощи ракет будет разрешена проблема межпланетных полетов. Ракетный двигатель позволяет перебросить боевой груз в любую точку на поверхности земного шара, причем на перелет требуется меньше одного часа.

В принципе устройство ракеты очень просто: пороховая ракета состоит из камеры, наполненной прессованным порохом, и выходного сопла или простого отверстия. Прессованный порох не взрывается, а медленно сгорает; давление в камере повышается, и пороховые газы с большой скоростью вытекают из сопла, действуя на ракету с некоторой силой реакции. Скорость вещества перед истечением равна нулю, поэтому сила реакции равна произведению секундного расхода (равного количеству сгорающего вещества) на скорость истечения. Чем больше температура и давление перед истечением и чем меньше молекулярный вес газов, тем больше будет их скорость. Устройство жидкостного ракетного двигателя несколько сложнее: он состоит из камеры сгорания, сопла, турбонасосов и баков с горючим и окислителем. В качестве горючего можно использовать спирт, керосин, анилин, гидразин; в качестве окислителей — жидкий кислород, азотную кислоту, перекись водорода, жидкий фтор и др. Горючее и окислитель выдавливаются из баков сжатым азотом или накачиваются насосами. Ядерная ракета вместо камеры сгорания будет иметь реактор, а вместо горючего и окислителя — запас рабочего вещества с малым атомным весом: жидкий водород, аммиак, гидразин, воду или гидрид лития. Нагревшись в реакторе и обратившись в очень горячий газ, рабочее вещество будет вытекать из сопла.

Чем больше скорость истечения, тем больше удельная тяга ракетного двигателя.

Удельной тягой называется тяга, получаемая при истечении одного килограмма рабочего вещества или горючего в секунду. Если при расходе G *кГ/сек* ракета развивает тягу R *кГ*, то удельная тяга равна:

$$J = \frac{R}{G} \text{ сек.}$$

Чем больше удельная тяга, тем больше конечная скорость, которую может развить ракета.

Удельная тяга ракетных двигателей

Тип двигателя	Пороховой	Жидкостный	Ядерный
Удельная тяга	120—270	200—400	400—800

Время, в течение которого ракета может подниматься вертикально вверх с работающим двигателем, прямо пропорционально удельной тяге. Действительно, тяга ракетного двигателя при вертикальном взлете больше начального веса аппарата $P_{нач.}$ Запас топлива составляет 50—90% от полного веса. Разделив запас топлива на ежесекундный расход, найдем продолжительность действия двигателя:

$$t = \frac{P_{топ}}{G} = \frac{P_{топ}}{R} J \text{ сек.}$$

Чем больше удельная тяга, тем больше время разгона и тем бóльшую скорость успеет развить ракета. Немецкая ракета дальнего действия, применявшаяся в 1944—1945 гг., обладала относительным запасом топлива в 68% и удельной тягой 200; продолжительность действия двигателя составляла всего 70 сек., но за это время ракета развивала скорость около 1500 *м/сек*. Советская баллистическая ракета, выведшая за пределы земного тяготения первую в мире космическую ракету, обладала бóльшей удельной тягой и бóльшим запасом топлива и развила скорость свыше 11 000 *м/сек*. Для межпланетного полета нужна ракета с еще большей удельной тягой или с еще бóльшим относительным запасом топлива. Подробнее о проблемах межпланетных сообщений говорится в статье «Советские ракеты и искусственные спутники Земли», помещенной в этом же томе ДЭ.

ПРИБОРНОЕ ОБОРУДОВАНИЕ САМОЛЕТА

Наиболее сложной и дорогой частью оборудования самолета являются установленные на нем приборы. Авиационные приборы столь многообразны, что в кратком очерке о них можно дать лишь самое общее представление.

Приборы располагаются на панели перед сиденьем пилота (рис. 23). Центральное место занимают радиолокатор, гирокомпас, гирогоризонт, спидометр, высотомер (альтиметр) и термометр, показывающий температуру атмосферного воздуха. По сторонам панели расположены приборы, позволяющие судить о работе двигателей: указатель числа оборотов — тахометр; расходомер, показывающий расход горючего; уровнемер, показывающий количество горючего в баках, и термометры, показывающие температуру масла, горючего и ответственных частей двигателя.

Каждый двигатель многомоторного самолета снабжен своим комплектом приборов. Прин-

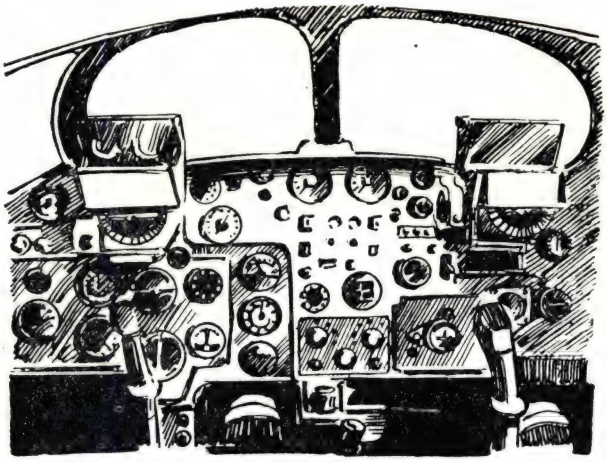


Рис. 23. Приборы двухместного самолета.

ципы действия приборов различны; существуют приборы гироскопические, аэродинамические, электромагнитные, инерционные, термоэлектрические, радиолокационные и др. Мы познакомимся только с главнейшими.

Основной частью всех гироскопических приборов служит гироскоп — быстро вращающийся маховичок, укрепленный на кардановом подвесе, который устроен так, что корпус прибора можно поворачивать как угодно, не влияя на маховичок. Ось вращающегося гироскопа стремится сохранить постоянное положение в пространстве (рис. 24). Под влиянием внешних воздействий гироскоп совершает сложные движения. Математическая теория гироскопа была разработана акад. А. Н. Крыловым (1863—1945).

Те, кто катается на велосипеде, из практики знакомы с поведением гироскопа, так как велосипедные колеса тоже являются гироскопами. Быстро вращающееся колесо стремится сохранить постоянное положение своей оси в пространстве. Поэтому, чем больше скорость, тем легче сохранить равновесие при езде на велосипеде. При наклоне корпуса в сторону, например направо, переднее колесо не только наклоняется, но в то же время само поворачивает направо. В этом и состоит основное свойство гироскопов: вращающийся гироскоп стремится сохранить постоянное положение оси в пространстве, но под действием силы, стремящейся изменить плоскость вращения, гироскоп поворачивается не в плоскости действия сил, а под прямым углом к ней (рис. 24, *а*). Свойства гироскопа использованы в гироскопических приборах.

Гирогоризонт состоит из гироскопа на кардановом подвесе, заключенного в корпус, на переднем стекле которого нарисован контур самолета (рис. 24, *б*). Ось гироскопа сохраняет постоянное положение в пространстве, как бы ни поворачивался самолет с установленным на нем прибором. С подвесом гироскопа соединена стрелка, которая все время остается параллельной горизонту. Положение, занимаемое нарисованным самолетом относительно неподвижной стрелки, соответствует истинному положению самолета относительно горизонта. Следя за гирогоризонтом, летчик может вести самолет в сплошном тумане или в темноте.

Гирокомпас состоит из гироскопа, ось которого благодаря действию особых устройств все время остается параллельной географическому меридиану. С подвесом гироскопа соединена стрелка, следя за которой летчик ведет самолет по заданному курсу.

Помимо гироскопических приборов, на самолете имеется ряд аэродинамических приборов, воспринимающих полное и статическое давление набегающего воздуха.

Спидометр, или махметр, состоит из упругой мембраны, к которой подведены трубки полного и статического давления, выведенные за борт самолета. При увеличении скорости разность между полным и статическим давлением увеличивается, мембрана выгибается и движет стрелку. Ясно, что на показания прибора влияют давление и температура атмосферного воздуха, так что летчику приходится вносить поправки.

Рис. 24. Гироскоп и его применение: а) принцип действия гироскопа, б) гирогоризонт.

Альтиметр, или высотомер, устроен, как обыкновенный барометр-анероид. С увеличением высоты давление падает, мембрана выпучивается и движет стрелку (рис. 25). Чем меньше температура воздуха, тем меньше его объем и тем быстрее падает давление с высотой. В показания альтиметра тоже надо вводить поправку на температуру.

Рис. 25. Альтиметр.

Важное место на самолете занимает радиооборудование.

Радиополукомпас состоит из небольшой вращающейся кольцевой антенны, приемника и стрелочного прибора, похожего на компас. Приемник настраивается на любую работающую радиостанцию. Вращающаяся антенна воспринимает радиоволны только в те мгновения, когда плоскость антенны бывает перпендикулярна к направлению волн (рис. 26).

Стрелка прибора указывает, в каком положении бывает антенна в момент получения сигнала, т. е. направление на радиостанцию.

Радиолокатор состоит из передатчика, посылающего прерывистые сигналы на ультракоротких волнах, приемника и электронно-лучевой трубки — кинескопа. Ультракоротковолновый сигнал отражается от любого встреченного препятствия, возвратившись, воспринимается приемником и, воздействуя на электронный луч, дает на экране кинескопа светлую точку. Чем дальше расположен отражающий предмет, тем дольше будет радиосигнал идти до него и обратно, тем дальше получится светлая точка от начального положения. Радиолокатор не только предупреждает о существовании препятствия — встречного самолета, горы, башни и тому подобного, но и указывает, в каком направлении и на каком расстоянии оно находится. Если направить луч локатора вниз, он будет указывать расстояние до земной поверхности, т. е. высоту полета. Существуют панорамные локаторы, на экране которых возникает своеобразная контурная карта местности, находящейся под самолетом.

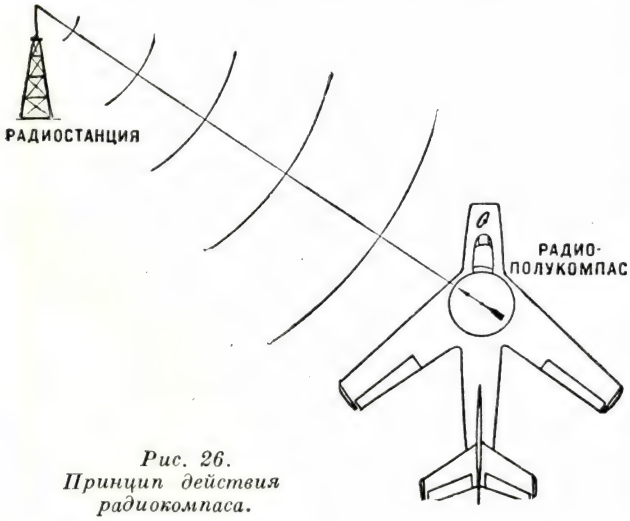


Рис. 26. Принцип действия радиокомпаса.

Постоянно действующие воздушные линии оборудованы радиомаяками.

Радиомаяк представляет собой радиостанцию, которая посылает направленный радиосигнал, напоминающий луч прожектора. Летчик, следуя по лучу маяка и включая наушники, слышит сигналы. При отклонении от оси луча вправо характер сигналов меняется иначе, чем при отклонении влево. Поэтому летчику нетрудно удерживать самолет на правильном направлении.

Приборное и радиооборудование позволяет поддерживать регулярное воздушное сообщение в любое время суток и почти при любой погоде.

Наблюдая за приборами, летчик оценивает положение самолета и, воздействуя на рули, вносит в полет соответствующие поправки. Для облегчения управления на тяжелых и скоростных самолетах рули приводятся в движение электрическими или гидравлическими служебными машинами. Таким образом, пилот превращается в связующее звено между рулевыми машинами и приборами. Но человеческий мозг воспринимает, обобщает и делает выводы не мгновенно: этот процесс длится не менее нескольких десятых долей секунды.

Система, в которой между приборами и машинами установлена непосредственная электрическая или механическая связь, во многих случаях может действовать быстрее и надежнее пилота. Подобное устройство называется автопилотом. Многие самолеты, а также управляемые снаряды ведутся автопилотами, которые могут реагировать на воспринимаемые сигналы в несколько раз быстрее, чем летчик.

Пилотируемый самолет, как мы уже говорили, не может уйти от управляемого автопилотом самонаводящегося снаряда, который способен «соображать» гораздо быстрее и выдерживать бо́льшие перегрузки, чем человек.

ПЛАНЕРЫ

Планером называется безмоторный самолет. За исключением двигателя, планер имеет те же основные части. Планер запускается на тросе против ветра (как воздушный змей) стартовой командой, автомобилем или самолетом. Взлетев, планерист отцепляет трос и переходит к самостоятельному полету, скользя вниз, как по

Рис. 27. Силы, действующие на планер.

наклонной плоскости (рис. 27). Нетрудно сообразить, что отношение расстояния, проходимого планером в горизонтальном направлении l, к снижению h равно аэродинамическому качеству планера k:

$$\frac{l}{h} = k = \frac{P}{R} = \frac{w}{w_{\text{вер}}}.$$

Поэтому скорость снижения планера невелика; попав в восходящий ток воздуха, который обычно бывает увенчан кучевым облаком, планер может набрать высоту в тысячи метров и улететь на сотни километров от места взлета. В воздухе планер способен выполнять все фигуры высшего пилотажа. Планерист, сидящий в открытой кабине и не оглушаемый ревом моторов, наслаждается ощущением полета; планеризм является увлекательнейшим спортом. Посадочная скорость планера мала; поэтому он может сесть на очень небольшую площадку. Планеры применяются для переброски грузов, для высадки десантов, для тренировки пилотов (рис. 28).

Рис. 28. Учебный планер.

Существующие планеры летают со скоростями нескольких десятков километров в час.

Рис. 29. Полубаллистический планер.

Проектируются сверхзвуковые полубаллистические планеры (рис. 29), которые, стартуя с помощью ЖРД, будут развивать скорость в тысячи метров в секунду. Пролетев по баллистической кривой в безвоздушном пространстве, планер возвратится в атмосферу, но подъемная сила крыльев снова направит его вверх (рис. 30). Расчеты показывают, что, двигаясь по волнообразной кривой, как рикошетирующий от воды камень, полубаллистический планер

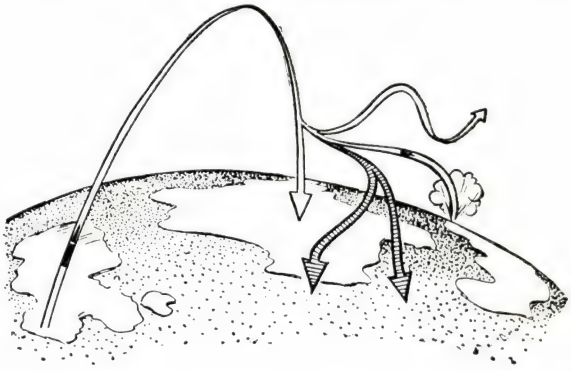


Рис. 30. Предполагаемая трасса полета полубаллистического планера.

сможет за полтора-два часа облететь вокруг земного шара или, следуя по наперед заданному маршруту, сможет достичь любой точки на земной поверхности. Такие полеты, помимо военных целей, могут служить переходной ступенью к созданию межпланетных кораблей, способных возвратиться назад и совершить посадку на Земле после окончания путешествия на одну из планет солнечной системы.

ВЕРТИКАЛЬНО-ВЗЛЕТАЮЩИЕ МАШИНЫ

Скоростные самолеты нуждаются в больших оборудованных аэродромах с бетонированными взлетно-посадочными дорожками. В настоящее время создан ряд вертикально-взлетающих машин, способных подняться с лесной поляны, с городской площади, с палубы корабля или с любой другой небольшой площадки.

Вертолет, или геликоптер, представляет собой бескрылую летательную

Рис. 31. Легкий вертолет.

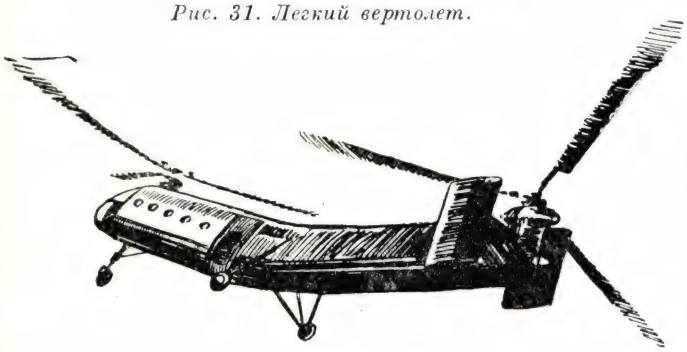


Рис. 32. Тяжелый вертолет.

машину, подъемная сила которой создается большим винтом — ротором, вращающимся в горизонтальной плоскости (рис. 31, 32). Модели вертолетов были впервые испытаны еще Ломоносовым. Подъемная сила лопастей вращающегося винта, или ротора, удерживает вертолет в воздухе, а сила сопротивления, которую преодолевает двигатель, заставляет всю машину вращаться в сторону, противоположную вращению винта. Для уравновешивания «реакции ротора» служит маленький винт, устанавливаемый на хвосте вертолета. Головка ротора имеет очень остроумное устройство, позволяющее ей наклоняться в любую сторону. При этом подъемная сила отклоняется от вертикали и увлекает машину в требуемом направлении: ротор служит и подъемником, и движителем.

Строительство вертолетов успешно развивается и в нашей стране. Советским машинам принадлежит ряд международных рекордов. Так, в 1955 г. на вертолете А. С. Яковлева был поднят груз в 4 *Т* на высоту 2000 *м*, а в 1956 г. на вертолете М. Л. Миля была развита скорость 187 *км/час* при полете по 500-километровому маршруту. Весной 1959 г. на тяжелом вертолете «МИ-6» были установлены мировые рекорды подъема груза в 5 и 10 *Т* на высоту 5500 *м* и почти 5000 *м*.

Ротор вертолета приводится в движение поршневым или газотурбинным двигателем, с которым он соединен сложной и тяжелой передачей. Значительно проще и легче реактивные вертолеты. Хорошими возможностями обладает газотурбинный вертолет, в котором воздух, сжатый компрессором, подается в реактивные сопла, установленные на концах лопастей. Реакция воздушных струй приводит ротор во вращение, как струи пара вращают известную всем вертушку Герона Александрийского. Еще более прост реактивный вертолет, на лопастях которого установлено два ПВРД (рис. 33). Центробежная сила, возникающая при вращении, используется для подачи горючего. Первичная раскрутка ротора производится с помощью ручного инерционного стартера. Реактивные вертолеты не испытывают реакции ротора, так как двигатели расположены на самих лопастях. Основным недостатком реактивных вертолетов является относительно большой расход горючего.

Вертолеты широко применяются для связи с труднодоступными районами, при экспедициях (например, в Арктике и в Антарктиде) для ледовой разведки, при тушении лесных пожаров, для борьбы с вредителями сельского хозяйства, при переправах, десантах и т. д.

Вертолеты принципиально не могут развивать скорости больше 360 *км/час*, так как при этом лопасть ротора, движущаяся навстречу потоку, обтекается со скоростью более

Рис. 33. Реактивный вертолет.

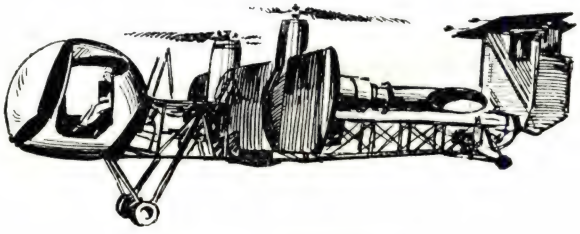


Рис. 34. Конвертоплан

700 *км/час* и к.п.д. винта резко падает. Значительно быстрее летают конвертопланы.

Конвертоплан — самолет, воздушный винт или все крыло с двигательной установкой которого могут поворачиваться на 90° (рис. 34). При взлете винты конвертоплана ставятся в вертикальное положение, а при переходе на горизонтальный полет поворачиваются параллельно оси машины. Конвертопланы развивают такую же скорость, как и обыкновенные винтомоторные самолеты. Но они значительно сложнее и тяжелее вертолетов, а потому поднимают относительно меньший груз.

Вертикально - взлетающие самолеты обладают тягой, превышающей их начальный вес (рис. 35). Самолет, устанавливаемый вертикально на хвостовых стойках, взлетает под действием двух соосных винтов, вращающихся в противоположные стороны, или реактивного двигателя. Набрав высоту и скорость, он переходит на горизонтальный полет. Снижение производится вертикально, хвостом вниз. Если же горючее израсходовано, снижение может производиться так же, как и на обычном самолете.

Ведутся работы над созданием вертикально-взлетающего самолета с поворотными реактивными двигателями, которые будут служить и для вертикального взлета и для горизонтального полета.

Летающие двигатели (рис. 36). Реактивные двигатели свободно держатся в воздухе, так как их тяга в несколько раз больше веса. Для горизонтального продвижения устраиваются особые сопла. Практического значения подобные установки пока не имеют.

Колеоптер представляет собой вертикально-взлетающий самолет с кольцевым крылом (рис. 37). Зазор между крылом и корпусом используется в качестве прямоточного двигателя. Колеоптер взлетает с помощью ракетного или турбореактивного двигателя, установленного в корпусе, и, развив сверхзвуковую скорость, переходит на ПВРД. Колеоптеры обладают большой скороподъемностью и прочностью, но их аэродинамическое качество меньше, чем у самолетов с плоскими крыльями.

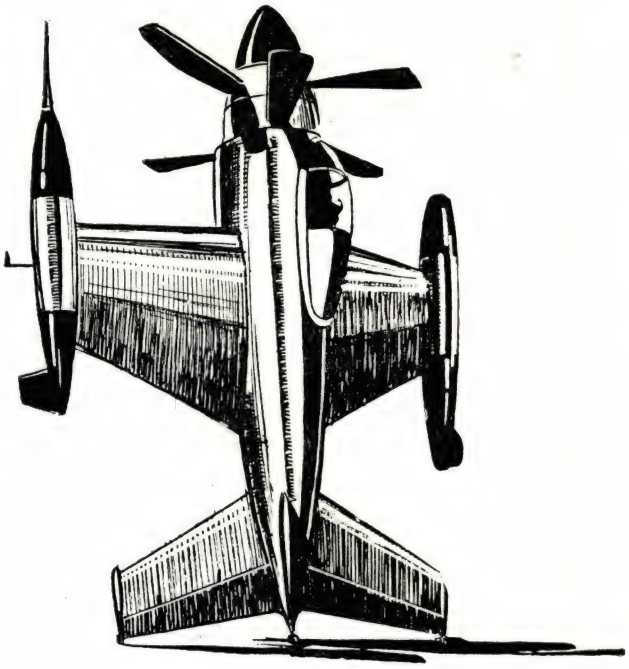


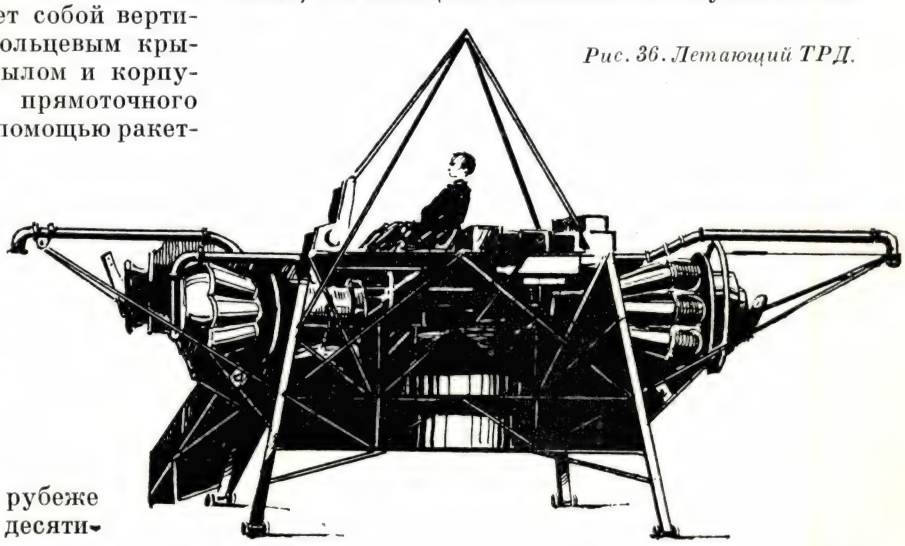
Рис. 35. Вертикально-стартующий самолет.

БУДУЩЕЕ АВИАЦИИ

Люди научились летать на рубеже XIX и XX вв. За истекшие десятилетия дальность самолетов стала достаточной для беспосадочного полета в любую точку земного шара. Высота приблизилась к 40 *км*; скорость превзошла утроенную скорость звука. По какому же пути пойдет дальнейшее развитие авиации и есть ли предел ее возможностям?

Прежде чем ответить на этот вопрос, напомним, что авиацией называют совокупность ма-

Рис. 36. Летающий ТРД.



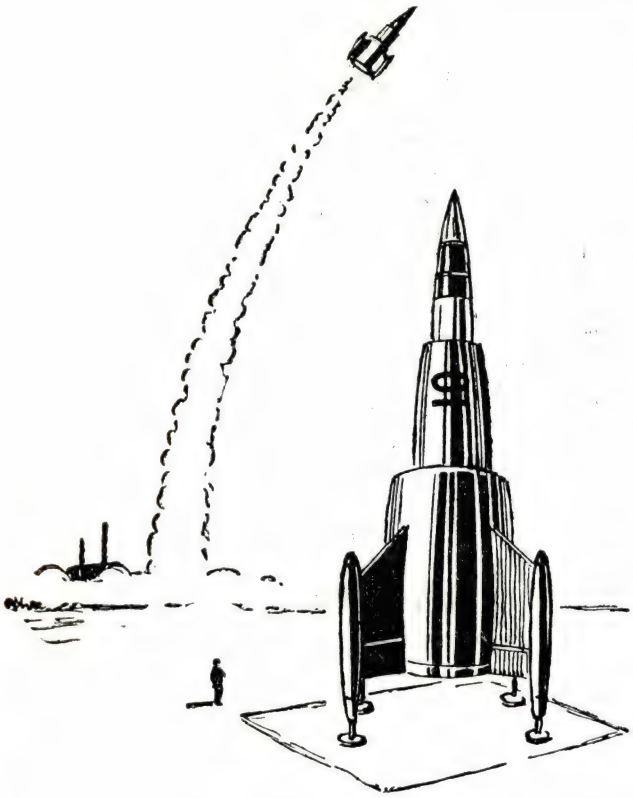


Рис. 37. Колеоптер.

шин, предназначенных для полетов в пределах земной атмосферы. Для такой авиации предел существует. Это высота до 50 *км* над уровнем моря: выше практически нет воздуха, на который могло бы опираться крыло самолета. Предельная скорость М=10—20; дальнейший рост скорости ограничен тепловым барьером. Предельная дальность ограничена размерами земного шара, самое большое расстояние на котором (с возвратом в исходную точку) равно 40 000 *км*. Для достижения этих пределов понадобятся новые жаростойкие, прочные и легкие материалы, а также новые горючие с более высоким содержанием энергии, чем у применяемых теперь нефтепродуктов. Такими значительно более теплотворными горючими являются искусственные вещества, получаемые химическим путем из водорода и бора, а также ядерное горючее.

Бороводородные горючие ядовиты и могут быть применены только на военных машинах. Для использования ядерного горючего необходимо создать надежные и легкие реакторы. Работающий реактор испускает нейтроны и гамма-лучи, губительные для всего живого. Чтобы сделать ядерную силовую установку безопасной, реактор окружают толстым и тяжелым защитным слоем. Вес авиационного ядерного двигателя с защищенным реактором будет составлять десятки тонн. Ядерный самолет сможет летать тем быстрее и выше, чем больше удастся поднять температуру реактора: до 1000° и выше (в реакторе первой в мире советской атомной электростанции вода нагревается примерно до 300°). Дальность ядерного самолета неограниченна. На таких самолетах можно будет поддерживать регулярную пассажирскую и грузовую связь между любыми пунктами на земной поверхности.

Уже в наши дни авиация перестала быть последним достижением науки. Значительно бо́льшими возможностями обладает ракетная техника, ближайшей задачей которой является организация сообщений с планетами солнечной системы, а затем и с другими звездными мирами. Но об этом будет подробно рассказано в другой статье.

СОВЕТСКИЕ РАКЕТЫ И ИСКУССТВЕННЫЕ СПУТНИКИ ЗЕМЛИ

Быть может, уже много тысяч лет назад, глядя на ночное небо, человек мечтал о полете к звездам. Мириады мерцающих ночных светил заставляли его уноситься мыслью в безбрежные дали Вселенной, будили воображение, заставляли задумываться над тайнами мироздания. Шли века, человек приобретал все бо́льшую власть над природой, и только мечта о полете к звездам оставалась все такой же несбыточной, как и тысячи лет назад. Легенды и мифы всех народов полны рассказов о полете к Луне, Солнцу и звездам. Однако средства для такого полета, предлагавшиеся народной фантазией, были примитивными: колесница, влекомая орлами, крылья, прикрепленные к рукам человека...

В XVII в. появился рассказ французского писателя Сирано де Бержерака о полете на

Луну. Герой этого рассказа добрался до Луны в железной повозке, над которой он все время подбрасывал сильный магнит. Притягиваясь к нему, повозка все выше поднималась над Землей, пока не достигла Луны. Известный английский писатель Герберт Уэллс описал фантастическое путешествие на Луну в снаряде, корпус которого был сделан из материала, не подверженного силе тяготения.

Разные предлагались средства для осуществления космического полета, но ни один ученый, ни один писатель-фантаст за многие века не смог назвать единственного находящегося в распоряжении человека средства, с помощью которого можно преодолеть могучую силу земного притяжения и унестись в межпланетное пространство. Великая честь открыть людям дорогу к звездам выпала на долю нашего соотечественника Константина Эдуардовича Циолковского.

Скромный калужский учитель сумел рассмотреть во всем известной пороховой ракете прообраз могучих космических кораблей будущего. Его идеи до сих пор служат и еще долго будут служить основой создания ракет и освоения человеком околосолнечного пространства.

Почти две тысячи лет прошло с тех пор, как изобретатели пороха — древние китайцы —построили первые ракеты, но только Циолковский показал, что единственный летательный аппарат, способный проникнуть за атмосферу и даже навсегда покинуть Землю,— это ракета. Он не только обосновал общие принципы, но и произвел подробные практические расчеты, в результате которых замечательный ученый и пришел к выводу о необходимости создания ракетных поездов, или, как мы теперь говорим, многоступенчатых ракет, а также о необходимости создания искусственных спутников Земли.

Циолковский заинтересовался проблемой летания еще в 80-х годах прошлого века, когда и авиации-то, даже самой примитивной, еще практически не существовало.

Правда, в это же время в России работал другой талантливейший инженер и изобретатель Александр Федорович Можайский. Много лет жизни и самоотверженного труда, так же как и Циолковский, не получая ниоткуда поддержки, отдал он созданию летательного аппарата. В 1882—1884 гг. он построил самолет, имевший все основные части современных самолетов: несущее крыло, винтомоторную группу, фюзеляж, хвостовое оперение, шасси. Но в условиях царской России замечательное изобретение не смогло пробить себе дорогу: оно было заброшено и забыто. Умер в безвестности и его создатель.

Лишь десять лет спустя отдельные самоучки-изобретатели на Западе стали делать попытки построить летательные аппараты, куда менее совершенные, чем самолет Можайского. В декабре 1903 г. американцам братьям Райт удалось на построенном ими самолете продержаться в воздухе 59 сек. (Эту дату западные историки склонны рассматривать как начало «эры авиации».)

А за несколько месяцев до их полета в Петербурге была опубликована работа К. Э. Циолковского под названием «Исследование мировых пространств реактивными приборами», автор которой подробно разработал теорию ракеты как единственного двигателя, способного понести человека к другим планетам солнечной системы. Как же далеко вперед смотрел замечательный ученый! Уже тогда он сумел дать математически точный расчет ракеты, указать наиболее выгодное топливо для нее, дать идею составной ракеты и еще многое другое, что мы лишь теперь, пятьдесят с лишним лет спустя, претворяем в жизнь.

Что же представляет собой ракетный двигатель, на каких физических законах основано его действие?

Каждый знает, что выстрел из ружья сопровождается отдачей. Если бы вес пули равнялся весу ружья, они разлетелись бы с одинаковой скоростью и на равные расстояния. Отдача будет и при холостом выстреле, правда, она значительно меньше.

Отдача происходит потому, что отбрасываемая масса газов создает реактивную силу, благодаря которой может быть обеспечено передвижение как в воздухе, так и в безвоздушном пространстве. И чем больше масса и скорость истекающих газов, тем бóльшую силу отдачи ощущает наше плечо, тем сильнее реакция ружья, тем больше реактивная сила.

Если же патрон будет достаточно большим и будет все время выбрасывать непрерывную струю газов, мы сможем использовать реактивную силу для передвижения какого-нибудь аппарата, например автомобиля.

Пороховые ракеты, применявшиеся китайцами, и пороховые ракетные двигатели, широко применяющиеся в современной авиации для увеличения скорости самолета на взлете, в принципе мало отличаются друг от друга. Любая ракета состоит из корпуса, камеры сгорания и сопла. Горючее может располагаться пря-

мо в камере сгорания (в пороховых ракетах) или в отдельных баках. Сопло — это выходное отверстие для образовавшихся при сгорании топлива газов, которому придают форму раструба.

Циолковский вывел формулу, позволяющую рассчитать максимальную скорость, которую может развить ракета. Эта максимально достижимая скорость в первую очередь зависит, конечно, от скорости истечения газов из сопла ракеты. А скорость газов в свою очередь зависит прежде всего от вида топлива и температуры газовой струи. Чем выше температура, тем больше скорость.

Значит, для ракеты нужно подбирать самое калорийное топливо, которое при сгорании дает наибольшее количество теплоты.

Но максимальная скорость ракеты зависит не только от скорости истечения газов из сопла. Из формулы следует, что она зависит также от начальной и конечной массы ракеты, т. е. от того, какая часть ее веса приходится на горючее и какая — на бесполезные (с точки зрения скорости полета) конструкции: корпус, механизмы управления, рули и даже самую камеру сгорания и сопло.

Эта формула Циолковского является фундаментом, на котором зиждется весь расчет современных ракет. Отношение общей, стартовой массы летательного аппарата к его весу в конце работы двигателя (т. е. по существу к весу пустой ракеты) в честь великого ученого названо числом Циолковского.

Основной вывод из этой формулы состоит в том, что *в безвоздушном пространстве ракета разовьет тем большую скорость, чем больше скорость истечения газов и чем больше отношение начальной массы ракеты к ее конечной массе, т. е. чем больше число Циолковского.*

Установив, что предел скорости ракеты зависит от качества топлива и отношения полезной и «бесполезной» массы, Циолковский исследовал теплотворные возможности пороховых топлив. Его вычисления показали, что эти топлива не смогут обеспечить нужной температуры горения, а значит, и скорости истечения, необходимых для преодоления земного притяжения. Кроме того, рыхлый порох занимает большой объем, приходится увеличивать корпус и, следовательно, конечную массу ракеты.

Жидкое топливо может обеспечить нужную температуру сгорания. Но для него нужны прочные, а значит, тяжелые баки. Что же делать? Нельзя ли эти баки сбросить после того, как они будут опустошены?

Вот тут-то и появилась великолепная идея.

Циолковский предложил создать ракету из нескольких частей и нескольких самостоятельных ракет. По гениальной мысли ученого, ракетный поезд, летящий в заоблачные высоты, будет двигаться сначала с помощью самой нижней ракеты. Она разгонит его до определенной скорости и после выгорания всего топлива будет сброшена. Затем вторая ступень еще больше увеличит скорость и также отделится от ракеты. При этом общая масса ракеты будет постепенно уменьшаться.

На первый взгляд может показаться, что при такой конструкции выгодно делать как можно больше ступеней ракеты. Но расчеты убеждают, что это не так: максимальная скорость заметно увеличивается до трех-четырех ступеней, а дальше почти не растет. После шести ступеней скорость практически остается постоянной.

На много лет опередив своих современников, великий сын русского народа на точном языке математики впервые предсказал пути овладения человеком космическим пространством и указал реальные пути, по которым должна пойти техника межпланетных сообщений.

Еще в 1911 г. К. Э. Циолковский произнес свои вещие слова: «Человечество не останется вечно на Земле, но, в погоне за светом и пространством, сначала робко проникнет за пределы атмосферы, а затем завоюет себе все околосолнечное пространство».

Сейчас мы становимся свидетелями того, как начинает сбываться это великое предвидение.

МЕЖКОНТИНЕНТАЛЬНАЯ БАЛЛИСТИЧЕСКАЯ РАКЕТА

Как выглядит в общих чертах современная ракета сверхдальнего действия?

Прежде всего это многоступенчатая ракета. В головной части ее размещается боевой заряд, позади него — приборы управления, баки и, наконец, двигатель. В зависимости от топлива стартовый (начальный) вес ракеты будет в сто — двести раз превышать вес полезного груза! Поэтому весит она много десятков тонн. А в длину такой летательный аппарат дости-

Таблица 15. Старт многоступенчатой ракеты.

гает двух-трех десятков метров — высоты десятиэтажного дома! Все ступени ракеты заключают в корпус, которому придают обтекаемую форму, что необходимо для полета через атмосферу.

Конструкция ракеты должна отвечать ряду требований. Например, очень важно, чтобы сила тяги всегда проходила через центр тяжести ракеты. По мере сгорания топлива центр тяжести должен перемещаться строго по оси симметрии ракеты. Если не выполнить этого и еще некоторых других условий, то ракета может отклониться от заданного курса или даже начать вращательное движение. «Подправить» курс можно рулями. Пока ракета летит в плотном воздухе, могут работать аэродинамические (обычные самолетные) рули, а в разреженной атмосфере — предложенные еще Циолковским газовые рули, отклоняющие направление газовой струи.

Сейчас конструкторы начинают отказываться от рулей. Действительно, в начале полета плотность воздуха велика, но еще мала скорость ракеты, и поэтому воздушные рули плохо «управляют». А там, где ракета приобретает большую скорость, уже мала плотность окружающего воздуха. Газовые же рули хрупки и ломки, так как их приходится делать из графита или керамики.

Поэтому проще поставить несколько дополнительных сопел или поворачивать сам двигатель внутри ракеты. Например, на американской ракете, построенной по проекту «Авангард», двигатель подвешивают на шарнирах, и его можно отклонять в любую сторону от оси ракеты на 5—7°. Автопилот строго следит за курсом и, как только появляются отклонения, вырабатывает сигналы, которые приводят в действие сервомоторы — силовые устройства, поворачивающие двигатель таким образом, что его тяга, направленная под углом к оси, возвращает ракету на правильный курс.

Каждая ступень ракеты работает в совершенно различных условиях, которые и определяют ее устройство. Мощность и время работы каждого следующего двигателя должны быть меньше, а значит, и конструкция может быть проще.

В настоящее время двигатели баллистических ракет работают преимущественно на жидких топливах. В качестве горючего обычно применяют керосин, спирт, гидразин, анилин, а в качестве окислителей — азотную и хлорную кислоты, жидкий кислород и перекись водорода.

Очень активными окислителями являются фтор и жидкий озон, не нашедшие себе пока применения из-за крайней взрывоопасности. Существуют и так называемые однокомпонентные топлива — смеси горючего с окислителем (преимущественно различные виды пороха).

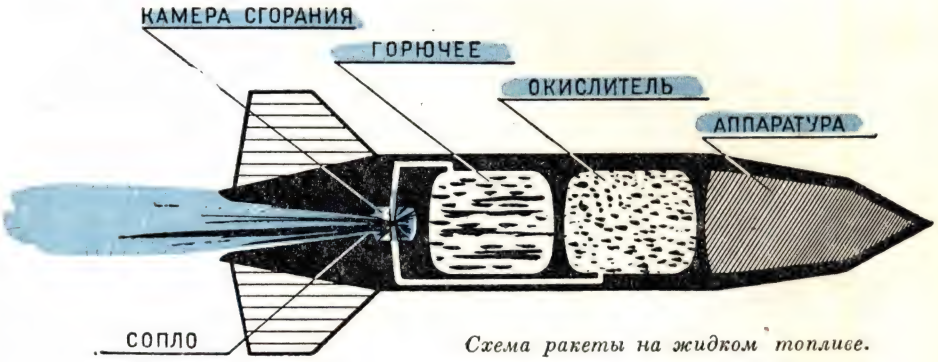


Схема ракеты на жидком топливе.

Наиболее ответственная часть ракеты — это двигатель, а в нем — камера сгорания и сопло. Здесь должны использоваться особо жаропрочные материалы и сложные методы охлаждения, так как температуры сгорания топлива доходят до 2500—3500°С. Обычные материалы таких температур не выдерживают.

Достаточно сложны и остальные агрегаты. Например, насосы, которые подавали горючее и окислитель к форсункам камеры сгорания, уже в ракете ФАУ-2 были способны перекачивать 125 *кг* топлива в секунду. В ряде случаев вместо насосов применяют баллоны со сжатым воздухом или каким-нибудь другим газом, который вытесняет горючее из баков и гонит его в камеру сгорания.

Запускается баллистическая ракета со специального стартового устройства. Часто это ажурная металлическая мачта или даже башня, около которой ракету собирают по частям подъемными кранами. Площадки на башне размещаются против смотровых люков, через которые

Таблица 14. Так может выглядеть будущий обитаемый спутник.

проверяют и налаживают сложное оборудование. После наладки ракету заправляют топливом и башня отъезжает. Ракета остается стоять на «столе» — массивной железобетонной плите, в средней части которой сделан специальный канал для равномерного отвода газовой струи.

Стартуя вертикально, ракета затем наклоняется и описывает почти строго эллиптическую траекторию. Значительная часть траектории полета таких ракет проходит на высотах больше тысячи километров над Землей, где сопротивление воздуха практически отсутствует. С приближением к цели воздушное покрывало нашей планеты начинает резко тормозить движение ракеты. При этом сильно нагревается ее оболочка, и, если не принять специальных мер, ракета может разрушиться, а ее заряд — преждевременно взорваться.

Советская исследовательская ракета.

Высокие, буквально астрономические скорости полета делают удар межконтинентальной баллистической ракеты совершенно внезапным и неотвратимым.

Как указывалось в сообщении ТАСС от 27 августа 1957 г., в СССР успешно осуществлен запуск многоступенчатой межконтинентальной ракеты. Полет проходил на огромных высотах, которых не достигал ни один летательный аппарат. Пройдя несколько тысяч километров, ракета попала в заданный район. Полученные результаты показали, что такие ракеты можно посылать в любую точку земного шара. Специалисты всех стран отмечали, что советская ракета не имеет себе равных в мире.

ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЕ РАКЕТЫ

Еще в 20-е годы в нашей стране конструировали ракеты для исследовательских целей. Эти работы завершились пуском в 1933 г. первой советской исследовательской ракеты с жидкостным ракетным двигателем конструкции М. К. Тихонравова. После Великой Отечественной войны работы были развернуты еще шире. А с 1949 г. у нас регулярно ведется исследование атмосферы специально созданными для этой цели метеорологическими ракетами.

Общепризнано, что современная советская метеорологическая ракета — лучшая в мире. На проводившейся в сентябре 1957 г. Международной научной конференции наша ракета вызвала восхищение всех ученых.

Если метеорологическим ракетам практически незачем подниматься выше 80—90 *км*, так как они предназначены для изучения слоев атмосферы, непосредственно влияющих на формирование погоды, то для изучения физики верхних слоев атмосферы применяются специальные исследовательские ракеты.

Это более «солидные» аппараты, задача которых состоит в том, чтобы подняться как можно выше, получить данные о всех слоях атмосферы и даже о заатмосферном пространстве.

На первых ракетах вес научно-исследовательской аппаратуры составлял всего 120—130 *кГ*. А ракета, стартовавшая в мае 1957 г., несла на своем борту аппаратуру весом уже в 2200 *кГ* и поднялась на высоту 212 *км*. 21 февраля 1958 г. мощная советская исследователь-

ская ракета, неся более полутора тонн научной аппаратуры, достигла высоты 473 *км* и установила мировой рекорд высоты для одноступенчатых ракет.

В течение всего полета, в том числе и тогда, когда полет происходил по инерции, ракета стабилизировалась при помощи специальных устройств, которые не давали ей вращаться. Это значительно увеличило точность измерений. Результаты их непрерывно передавались по радио или записывались на магнитную пленку и изучались после спуска контейнеров с аппаратурой на Землю.

Схематический внешний вид многоступенчатой ракеты.

Большая грузоподъемность советских ракет позволила, кроме аппаратуры, поднимать подопытных животных. В этих случаях контейнер с животным снабжался устройством для регенерации (восстановления) состава воздуха, киноаппаратом и приборами, контролирующими поведение животного в воздухе. Первыми высотными пассажирами были, как известно, собаки.

На первом этапе исследований герметическая кабина с собакой спускалась на парашютах с высот 100—210 *км*. Исследования показали, что ускорения, возникающие при взлете ракеты, а также при вхождении кабины в плотные слои атмосферы во время спуска, вполне переносятся животными. Также без вреда переносили они состояние невесомости, которое длилось, правда, не больше 6 мин.

Второй этап исследований должен был дать ответ на более сложный вопрос: сможет ли животное покинуть ракету на бо́льших скоростях и бо́льших высотах? Это особенно необходимо для возврата животных, а затем и человека с будущих искусственных спутников на Землю.

Советские ученые разработали герметические кабины и скафандры со специальными автоматическими устройствами, поддерживавшими необходимое давление воздуха и нужное содержание кислорода. В них животные выбрасывались, или, как принято говорить, к а т а п у л ь т и р о в а л и с ь, с высоты до 110 *км* при скорости полета 1—2 *км/сек*, причем катапультирование (т. е., по существу, выстреливание) производилось в наиболее сложных и опасных условиях: на нисходящих траекториях и даже во время беспорядочного падения ракеты.

Исследования показали, что устройства для обеспечения безопасного возвращения животных работали надежно и гарантировали благополучное приземление. Было также отмечено, что даже у тех животных, которые поднимались в верхние слои атмосферы несколько раз, не удалось обнаружить каких-либо вредных последствий полетов.

Не менее ценные показания приносили из высотных полетов многочисленные физические приборы.

Исследования атмосферы с помощью ракет необходимы даже при наличии спутников Земли. В самом деле, спутник летит, как правило, значительно выше 200 *км*, поэтому слои, лежащие ниже его орбиты, остаются неизученными. Кроме того, ракеты позволяют сделать «высотный разрез атмосферы», т. е. провести наблюдения в одно и то же время на разных высотах. Ракетные исследования, искусственные спутники, а также изучение ионосферы с помощью радиометров взаимно дополняют друг друга.

По программе Международного геофизического года осуществлена обширная программа

ракетных исследований. Ракеты стартовали в Заполярье — с Земли Франца-Иосифа — и в Антарктике, где первый запуск был произведен с борта экспедиционного судна «Обь» в районе Мирного. Запускали их и в средних широтах. Все это дало возможность накопить ценнейшие сведения о физических явлениях в верхних слоях атмосферы, сделать интересные биологические наблюдения.

СОВЕТСКИЕ СПУТНИКИ ЗЕМЛИ

Обычно последняя ступень многоступенчатой ракеты составляет всего 4—5% ее общего веса, а спутник должен быть еще в несколько раз легче. Достаточно сказать, что если увеличить его вес только на 1 *кГ*, то ракета должна была бы стать тяжелее на 200—250 *кГ*.

Тем более значительны и грандиозны достижения советских ученых и инженеров, запустивших первый спутник весом в 83,6 *кГ*, второй — более полутонны, а третий — свыше 1300 *кГ*! Легко подсчитать, что уже ракета-носитель второго спутника могла бы забросить на Луну тело в несколько килограммов.

Вес наших спутников красноречивее всяких слов говорит о том, что в нашей стране созданы удачной конструкции баллистическая ракета, мощные и легкие двигатели, найдено прекрасное топливо и разработана точнейшая система управления. Вес и размеры спутников говорят и о том, что это не поспешно заброшенный на орбиту «кусок металла», как успокаивали себя некоторые американские генералы, а самая совершенная техника самого передового в мире ракетостроения.

ЧТО ДАЛИ НАУКЕ ПЕРВЫЕ ИСКУССТВЕННЫЕ СПУТНИКИ

Все обсерватории мира, радиоклубы, тысячи астрономов-любителей и специально созданные наблюдательные пункты вели непрерывные наблюдения за спутниками. В СССР было создано 500 наблюдательных пунктов более чем в 300 точках страны.

За первым спутником у нас следили 66 оптических станций, а при радиоклубах ДОСААФ было организовано 28 наблюдательных пунктов. В работу включились и зарубежные обсерватории.

Наблюдения дали богатейший материал, который анализировался и обрабатывался новейшими вычислительными средствами, такими, например, как электронные машины.

Прежде всего многое стало ясно в таком вопросе, как прохождение радиоволн через ионосферу. Прием сигналов передатчиков со спутников многочисленными станциями, расположенными в разных точках Земли, и измерение интенсивности принимаемых сигналов позволяют как бы насквозь прощупывать ионосферу, определять ее свойства и строение.

Спутники помогли определить плотность атмосферы и концентрацию заряженных электрических частиц на различных высотах, изучить ту часть спектра солнечного излучения, которая задерживается атмосферой, получить данные об электростатических и магнитных полях на большом расстоянии от поверхности Земли. Все эти сведения очень важны для дальнейшего изучения физики Земли, физики атмосферы, для исследования причин ионосферных помех, для разработки новых методов связи.

Передатчики спутника работали на волнах 15 и 7,5 *м*.

На волне 7,5 *м* удавалось наблюдать «радиовосход» спутника. Радиовосход не совпадает с оптическим «восходом», так как радиоволны искривляются в ионосфере, и в «радиолучах» спутник появляется раньше. А искривления радиоволн зависят от концентрации в ионосфере электронов. Поэтому, зная степень искривления, удалось рассчитать изменения электронной концентрации на разных высотах, в том числе и выше «главного максимума» ионосферы, располагающегося на высоте около 300 *км*. Наземными методами эти исследования произвести не удавалось.

Особенно важно, что удалось измерить электронную концентрацию во внешней части ионосферы обычными способами радиозондирования; с Земли этого сделать не удавалось. Знать же это необходимо для полного понимания взаимодействия ультрафиолетового излучения Солнца с атмосферой, для изучения условий распространения радиоволн, а также свойств и состава межзвездного газа.

Расчеты, которые надо было производить, были чрезвычайно сложны. Быстрое их завершение стало возможным благодаря тому, что для этой цели применялась быстродействующая электронная машина.

Не менее важны были и наблюдения за спутниками с помощью зрительных аппаратов. По ним определялись элементы орбиты и предсказывалось движение спутника. Выяснение точной траектории позволяет провести ряд геофизических исследований — уточнить форму Земли, степень ее сплюснутости и т. д.

Действительная траектория спутника отличается от расчетной. Это отклонение говорит о неравномерности поля земного тяготения, которое в свою очередь определяется распределением массы внутри нашей планеты. Стало быть, ученые пополнили сведения о земном поле тяготения и о строении Земли. Правда, такие измерения уже делались на основании изучения движения Луны. Но легкий маленький спутник, летящий на высоте нескольких сот километров над земной поверхностью, «чувствует» земное поле тяготения неизмеримо лучше, чем огромная и далекая Луна.

На конечном этапе «жизни» спутников, при их торможении в атмосфере, геофизики получили важнейшие сведения о плотности атмосферы. Интересно отметить, что эта величина оказалась в 5—10 раз большей, чем предсказывалось ранее на основании ракетных наблюдений. А вычисления, произведенные по наблюдениям за первым спутником, его ракетой-носителем и вторым спутником, практически во всем совпадают.

Наблюдения за движением спутников и за изменением их орбиты позволяют наряду с плотностью определять также температуру верхних слоев атмосферы. И здесь полученные результаты были неожиданными: на высотах порядка 225 *км* температура оказалась больше, чем это предполагалось на основании теоретических соображений. В результате перед физиками возникла новая научная проблема: что служит источником нагревания верхних слоев атмосферы?

Не менее интересные данные получены при изучении космических лучей. Это корпускулярное излучение — несущиеся из Космоса частицы различных энергий — сильно поглощается атмосферой, поэтому изучение космических лучей с поверхности Земли затруднено. Приборы второго советского спутника Земли дали и в этом отношении интереснейшие сведения.

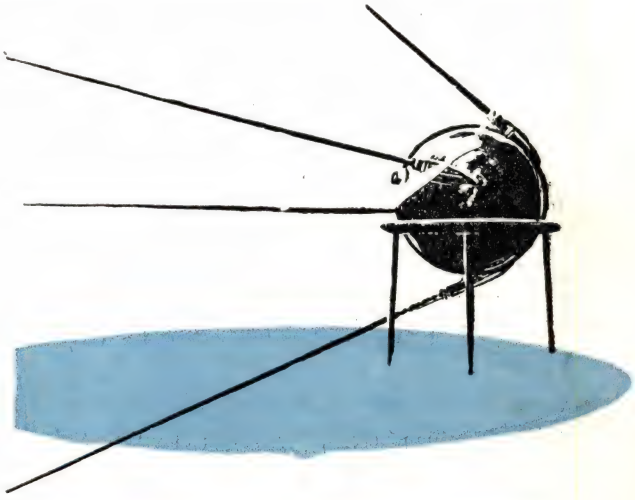
Второй спутник пролетал над Землей на разных высотах, что позволило изучить интенсивность распределения космических лучей по высоте. В частности, физики уточнили прежние теоретические представления о магнитном поле Земли, так как прежние измерения были сугубо «земные», а космические лучи «прощупывают» земное магнитное поле на больших высотах.

Особое положение занимают биологические исследования, проведенные над живым существом, впервые заброшенным в Космос. На втором советском спутнике был уже живой пассажир — собака Лайка. Богатый материал о ее жизни на спутнике позволил нашим ученым вплотную приблизиться к изучению природы биологических явлений, возникающих при полетах в космическом пространстве. Ведь только на спутнике можно создать условия длительной невесомости, космического и ультрафиолетового облучения. Невесомость удавалось получать и на ракетах, но продолжительностью всего в несколько минут. То же относится и к облучениям. Однако необходимо изучать, как влияет на организм длительное воздействие космических лучей. Ведь космические частицы поражают живые ткани не сразу. Существует так называемый «скрытый период» их разрушительной работы, о которой пока известно очень мало.

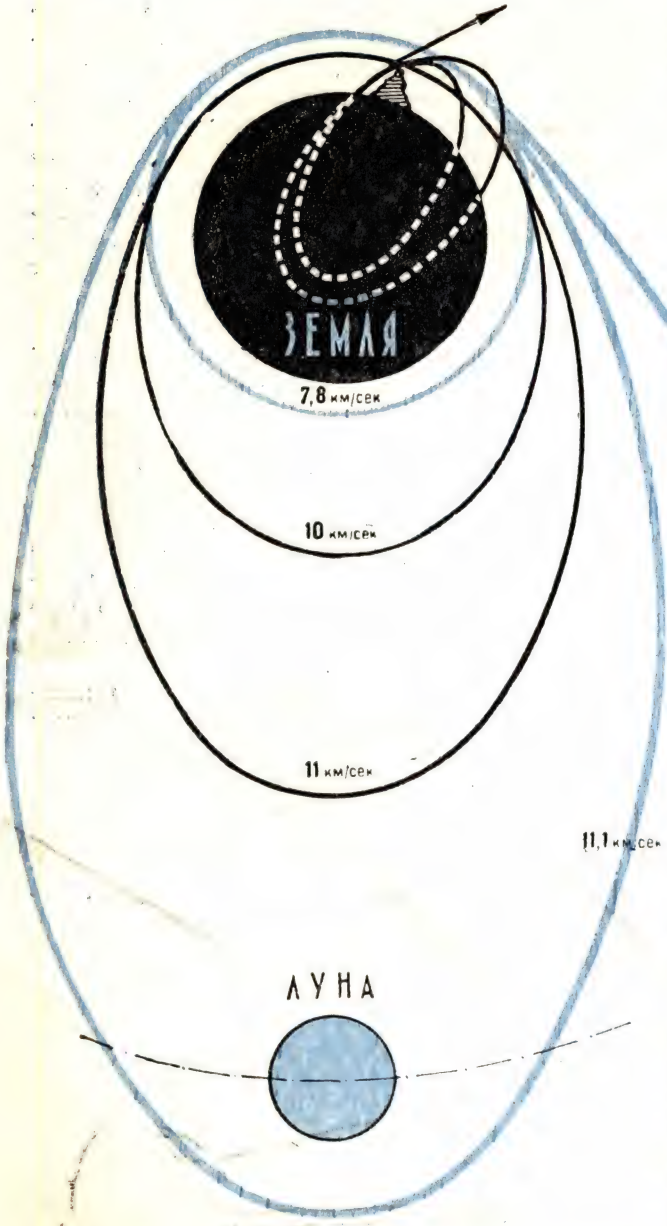
Хотя жизнь Лайки на спутнике продолжалась сравнительно долго, какого-либо воздействия космической радиации на жизненные функции обнаружить не удалось. Значит, в местах средней концентрации резкого действия космические лучи не оказывают. Но для подробного изучения этого вопроса нужно еще более тщательное и длительное исследование животных после полета.

Длительное пребывание в состоянии невесомости также не дало каких-либо болезненных явлений или нарушений нормальной жизнедеятельности. И хотя в начале полета дыхание и деятельность сердца собаки изменились, через некоторое время состояние животного приблизилось к тому, которое было перед стартом.

Но, пожалуй, самое важное — это то, что животное уверенно перенесло огромные ускорения, которые развивала ракета на участке от



Первый в мире советский искусственный спутник Земли.



Если бросить камень под углом к горизонту, он всегда упадет на Землю. Только пустив ракету параллельно земной поверхности, можно вывести ее на орбиту и сделать спутником Земли.

старта до выхода на орбиту. А величина их во много раз превышала земное ускорение силы тяжести, а значит, во столько же раз как бы увеличивался вес Лайки.

Самое ценное, что дал первый опыт посылки животного в Космос,— это, конечно, сам факт положительного исхода эксперимента. Он показал, что условия старта на космической ракете переносятся живыми существами удовлетворительно.

ЗАКОНЫ ДВИЖЕНИЯ СПУТНИКОВ

Давным-давно люди заметили, что брошенное тело обязательно возвращается на Землю. Говорят, Ньютон, увидев падающее яблоко, впервые задумался над тайнами тяготения, и именно этот случай привел его к открытию закона всемирного тяготения.

Случай с яблоком, возможно, и выдуман. Доподлинно, однако, известно, что, подсчитав силу земного тяготения, Ньютон задумался над следующим вопросом.

Если стать на вершину большой горы и бросить камень, то он, конечно, упадет вниз. Если бросить его сильнее, он упадет дальше. А если придать ему еще бо́льшую скорость, то он пролетит соответственно больший путь. Можно предположить, что в конце концов, приобретя достаточную скорость, камень облетит Землю и вернется на вершину горы, откуда он начал свое движение. Допустим далее, что атмосфера не мешает его полету. Значит, скорость его за время полета не уменьшится, и камень, следовательно, продолжит путь вокруг планеты, станет ее спутником.

Но какую же скорость необходимо сообщить будущему спутнику, чтобы уравновесить силу притяжения Земли? Подсчет по формуле Ньютона несложен — 7,9 *км/сек* у поверхности Земли. Эта скорость называется первой космической, иначе — круговой скоростью, так как обладающее ею тело способно обращаться вокруг Земли по круговой орбите.

Ну а если скорость движения нашего камня превысит 7,9 *км/сек*? Сможет ли он и совсем преодолеть притяжение Земли? Расчеты отвечают и на этот вопрос. Последовательное увеличение скорости тела приводит к изменению формы его орбиты. Круг превращается в эллипс, а эллипс все больше и больше вытягивается. Если скорость тела составит 11,1 *км/сек*, то оно, совершая полет вокруг Земли, облетит и Луну — настолько удлинится его орбита! Но стоит увеличить скорость полета еще на 0,1 *км/сек*, и тело навсегда покинет Землю. Оно станет полноправным членом солнечной системы, самостоятельно обращающимся вокруг Солнца.

Скорость, при которой тело способно преодолеть притяжение Земли, называется второй космической скоростью. Долгое время решение такой задачи казалось просто любопытным теоретическим упражнением. Только теоретическим. Ведь человек был не в силах создать двигатель, способный сообщить телу столь огромную скорость. Даже артиллерийский снаряд в момент выстрела летит в несколько раз медленнее.

Однако даже при скорости 8 *км/сек* тело может и не стать спутником. Необходимо еще, чтобы скорость тела в горизонтальном направлении была не ниже круговой. Именно в горизонтальном, так как, сколько ни стреляй (например, вверх из зенитной пушки), снаряд все равно упадет на Землю, даже если его скорость немного превысит круговую.

Но, чтобы будущий спутник вращался вокруг Земли, одного условия горизонтального запуска недостаточно. Нельзя, например, заставить его летать по северному полярному кругу, нельзя сделать так, чтобы он все время летал на широте Москвы — спутник не может двигаться над какой-либо параллелью нашей планеты (исключение здесь — только нулевая параллель — экватор). Как бы ни запускали искусственную луну, плоскость, в которой лежит траектория ее полета (или плоскость орбиты, как ее обычно называют), обязательно должна проходить через центр Земли. Так же, конечно, движется и наш старый знакомый, естественный спутник Земли — Луна. Поэтому огромное значение имеет способ, каким спутник будет выведен на орбиту.

Мы уже знаем, что единственный двигатель, способный развить космическую скорость и вынести спутник за пределы атмосферы,— это ракетный. А ракета может выйти на орбиту различными способами: или медленно наращивать скорость, или же, наоборот, разогнаться рывком, как бы выстреливая самое себя. Чем медленнее она удаляется от Земли, тем больше действуют на нее силы притяжения и тем бо́льшая часть скорости поглощается этими силами. Если же разгоняться с бо́льшим ускорением, земное тяготение будет действовать меньшее время и отнимет меньшую часть скорости.

Поэтому далеко не одно и то же — разгонять ракету на всем пути до орбиты или сразу, за несколько десятков секунд, сообщить ей нужную скорость.

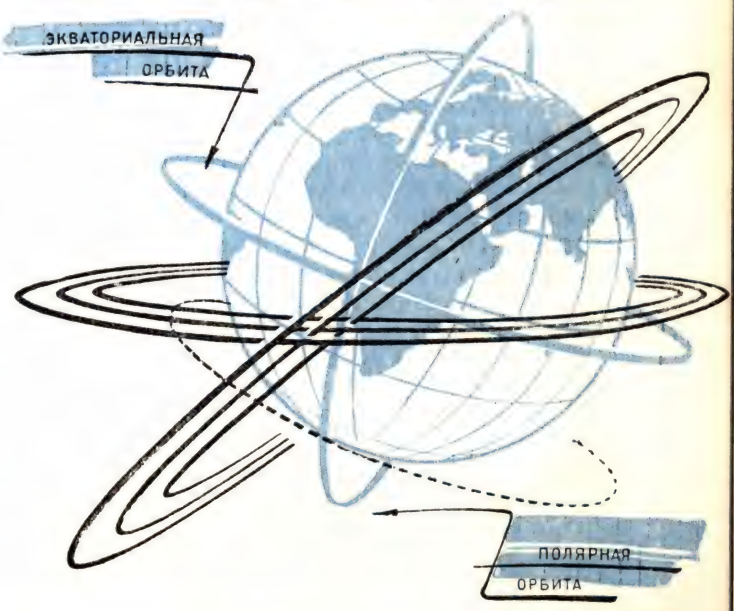
Содержимое спутника ставит первый предел допустимому ускорению: точные и хрупкие приборы могут не выдержать резкого толчка. Вторая неприятность — наличие на небольших высотах плотных масс воздуха. Чем больше скорость ракеты, тем больше сопротивление воздуха, тем больше требуется топлива для компенсации потери скорости и тем сильнее нагревается обшивка. Значит, очень больших ускорений при старте создавать нельзя.

Казалось бы, самый простой способ запуска ракеты состоит в том, что ее выбрасывают вертикально вверх — до высоты заданной орбиты— и в момент ее остановки в точке нулевой скорости сообщают ей такую скорость в горизонтальном направлении, чтобы она могла обращаться по круговой орбите. Тогда ракета не упадет на Землю и превратится в спутника. Этот метод не требует особой точности в скорости и направлении разгона, что сильно упрощает систему управления.

Но есть у этого способа и существенные недостатки.

Во-первых, потери скорости под действием силы тяжести гораздо больше при вертикальном взлете, чем при горизонтальном разгоне. Если, например, сила тяги ракеты превышает силу тяжести в четыре раза, то потери скорости от действия силы тяжести составляют при вертикальном разгоне 25%, а при горизонтальном только 3,5%. Таким образом, и это обстоятельство нужно учитывать при запуске спутника.

Кроме того, сообщать скорость ракете приходится дважды (при подъеме и для горизон-



Некоторые из возможных траекторий спутников.

Способы запуска спутников.

тального разгона по орбите). Таким образом максимальная скорость должна быть равна сумме этих двух скоростей. К сожалению, такая суммарная скорость получается очень большой, значительно большей, чем при других способах запуска. Поэтому данный способ запуска спутника практически неприменим.

Наименьшая суммарная скорость требуется в том случае, когда ракету разгоняют по эллипсу, самая удаленная точка которого находится на высоте выбранной круговой орбиты. Когда ракета достигнет этой точки, ей остается лишь сообщить дополнительную скорость, которая в сумме с уже имеющейся составит необходимую круговую скорость.

Трудность этого способа состоит в том, что ракете необходимо сообщить дополнительную скорость точно в тот момент, когда она находится на максимальном расстоянии от Земли. Для этого нужна очень большая точность в величине скорости и направлении разгона. Это при взлете по полуэллипсу.

Между этими «крайними» способами запуска ракеты существует среднее, компромиссное решение. Если выводить ракету на орбиту по эллиптической дуге, то необходимая для этого скорость (а значит, и расход топлива) будет меньшей, чем при вертикальном запуске. Требования к системе управления будут здесь несколько более строгими, но все же значительно меньшими, чем при запуске по полуэллипсу.

Значит, наивыгоднейшая траектория вывода спутника на орбиту — это баллистическая эллиптическая дуга. А поскольку ракета многоступенчатая, то двигатель каждой ступени начнет работать только в начале своего участка, разгоняя ракету с максимально допустимым ускорением.

Теперь разберемся в том, как же это осуществить. Что нужно сделать, чтобы будущий спутник полетел в нужном направлении с выбранной нами скоростью?

Если бы не было воздуха, то спутник можно было просто запустить вдоль поверхности Земли так, чтобы он только не задевал высоких гор. Но воздух — грозный враг всех скоростных летательных аппаратов, от сверхзвуковых самолетов до ракет. Чтобы не тратить зря горючее и не бороться с перегревом обшивки, трассу спутника прокладывают там, где сопротивление воздуха очень мало или отсутствует вовсе.

Сведения, добытые исследовательскими ракетами, позволили выбрать такую высоту. Уже на высоте 400 *км* плотность воздуха настолько мала, что точно запущенный спутник может «прожить» там не менее года.

Важно отметить, что с увеличением высоты орбиты величина необходимой круговой скорости падает, так как сила притяжения Земли с высотой постепенно ослабевает. Если на уровне Земли она составляет 7912 *м/сек*, то на высоте 200 *км* равна 7791 *м/сек*, а на высоте 400 *км* —7675 *м/сек*. Раз так, нужно забрасывать ракету повыше, тем более что там требуется меньшая скорость горизонтального разгона! Но тут мы опять должны сделать оговорку — с увеличением высоты подъема значительно возрастает расход топлива на преодоление силы земного тяготения.

Беда и в том, что технические трудности с увеличением высоты подъема возрастают колоссально, так как значительно увеличивается расход топлива на преодоление силы земного тяготения. Значит, задача сводится к тому, чтобы при имеющейся ракете забросить спутник как можно выше и там придать ему необходимую горизонтальную скорость.

Перечислив все особенности запуска спутников, мы не коснулись одного весьма интересного обстоятельства. Мы не учитывали вращения Земли. Будет ли оно влиять на скорость

ракеты? Нет, если мы запустим ракету через полюсы вдоль меридиана; но влияние его станет заметным, если ракета будет взлетать параллельно экватору. Каждая точка земной поверхности на экваторе движется вокруг центра Земли со скоростью 465 *м/сек*. Если ракету запускать по направлению вращения Земли, эта скорость целиком прибавится к скорости ракеты.

Правда, эта скорость составляет немногим больше 5% нужной круговой скорости, но все же ее выгодно использовать. Американцы, не имевшие достаточно мощной баллистической ракеты, запустили свои первые спутники именно таким образом. Для этого они использовали ракетный полигон, находящийся сравнительно недалеко от экватора, на восточном берегу Флориды, на мысе Канаверал.

Запустить спутник таким способом, конечно, легче, но он представляет собой меньшую ценность для ученых других государств, так как его можно наблюдать только с территории стран, лежащих в непосредственной близости от экватора. В Англии его не видят совсем, а в СССР он виден лишь на Кавказе и в Средней Азии, да и то низко над горизонтом. Но еще важнее то, что подобный спутник не дает сведений о процессах, происходящих на высоких широтах, и о состоянии слоев атмосферы над ними. Поэтому советские спутники были запущены так, что их орбиты охватывали почти всю Землю и практически их могло наблюдать все население земного шара. Лишь много позднее американцам удалось вывести спутник на полярную орбиту.

КОНСТРУКЦИЯ И ОСНАЩЕНИЕ ПЕРВЫХ СОВЕТСКИХ СПУТНИКОВ

Наш первенец был одет в «костюм» из алюминиевых сплавов, легкий и очень прочный. Роль защитной оболочки спутника исключительно велика. Прежде всего она должна быть достаточно прочной — двойной или даже тройной, чтобы предохранить находящиеся внутри приборы от грозного врага — метеоритов.

Но это не все! Когда спутник освещается Солнцем, он сильно нагревается, а в теневых сумерках резко охлаждается. Разность температур при этом может достигать примерно 100°. А ведь для приборов необходим нормальный тепловой режим. Это не только сложная, но и совершенно новая задача. И ее решили! Поверхность оболочки спутника обработали таким образом, что она отражала основную массу солнечных лучей, а в тени не давала излучаться теплоте спутника в пространство.

Мало того, для более равномерного распределения теплоты по всему спутнику его заполнили азотом. При помощи специальных вентиляционных устройств он циркулировал между приборами и оболочкой, нагреваясь у более теплых и отдавая теплоту более холодным частям конструкции.

На первом советском спутнике были установлены два радиопередатчика довольно значительной мощности. Обычные любительские приемники уверенно принимали их сигналы на расстоянии в сотни и даже тысячи километров.

Но сигналы спутника не только рассказывали о его местоположении и трассе полета. Незаметные на слух изменения их частоты и длительности сообщали ученым о происходящих на спутнике процессах, и в первую очередь о величине и колебаниях температуры внутри оболочки. За те несколько минут, что спутник проходил над наблюдательным пунктом, сигналы достаточно подробно не изучишь, и поэтому их записывали на магнитофонную пленку.

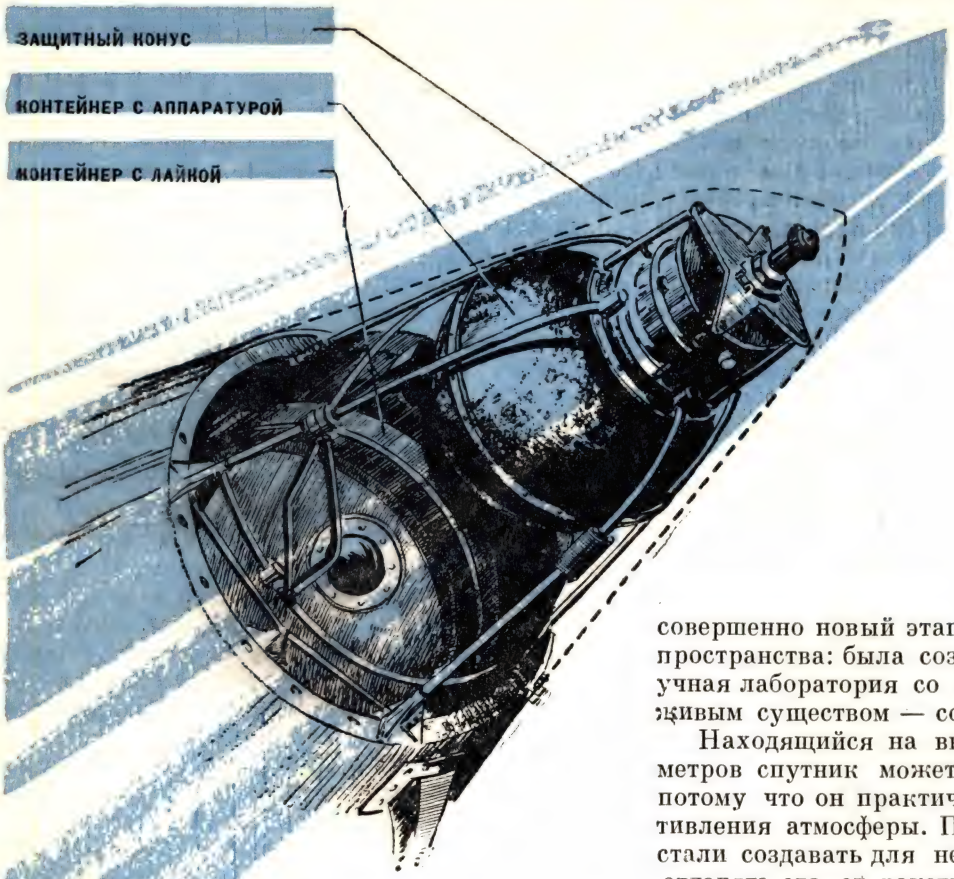
Следует напомнить, что время радиосвязи со спутником очень невелико. Оно немногим больше времени визуального, оптического наблюдения. Объясняется это тем, что распространяются короткие волны так же, как и световые лучи. Поэтому, когда спутник скрывается за горизонтом, радиоприем прекращается. Правда, и из этого правила есть исключения, зависящие от состояния ионосферы. Бывает, что радиолуч, преломляясь или многократно отражаясь, проходит огромные расстояния.

Сложное приборное хозяйство, особенно система терморегулировки, и два передатчика требовали достаточно мощных, а значит, и тяжелых источников питания.

Батареи гальванических элементов занимают на спутнике значительное место и, очевидно, бóльшую часть веса. Это и понятно! Приборы первого спутника должны были обязательно работать хотя бы неделю и сообщить побольше новых сведений.

Передатчики значительной мощности также должны были обеспечить (и обеспечили) уверенный прием этих сообщений как можно большему числу научных пунктов.

Примерно через 20 дней первый спутник умолк — батареи иссякли. Раскаляясь под лучами Солнца, замерзая в тени, он безмолвно кружился над Землей, отражая солнечные лучи



Второй советский искусственный спутник Земли.

и импульсы радиолокаторов. Просуществовав еще около двух с половиной месяцев, он сгорел в нижних, более плотных слоях атмосферы. Но и здесь он выполнил определенную задачу. Благодаря сопротивлению воздуха орбита спутника не остается круговой — она становится похожей на спираль довольно сложной формы. Изучение скорости движения спутника в каждой точке его пути и определение формы пути позволят выяснить сопротивление атмосферы на разных высотах, зависящее от плотности воздуха, его температуры и ряда других факторов. А изучение этих параметров составляет одну из важнейших проблем, решению которой помог спутник. В частности, зная, как и когда он снижался, ученые смогли точнее рассчитать сроки жизни других спутников.

Ракета-носитель, как и следовало ожидать, прожила меньше спутника. К концу ноября она опустилась в плотные слои атмосферы и в первый день декабря 1957 г. прекратила свое существование.

Запуск второго советского спутника открыл совершенно новый этап разведки космического пространства: была создана заатмосферная научная лаборатория со сложной аппаратурой и живым существом — собакой Лайкой.

Находящийся на высоте многих сот километров спутник может иметь любую форму, потому что он практически не встречает сопротивления атмосферы. Поэтому конструкторы не стали создавать для него отдельный корпус и отделять его от ракеты. Второй спутник — это сама ракета-носитель. Все приборы были размещены в носовой части корпуса последней ступени в специальных контейнерах — металлических ящиках, укрепленных на амортизаторах, которые смягчают толчок при старте ракеты.

Как видно из рисунка, передняя часть ракеты несет трехэтажную силовую раму. На верхнем этаже закреплен прибор для исследования коротковолнового участка солнечного спектра. Такое расположение позволяет солнечным лучам беспрепятственно проникать к прибору.

Ниже, на втором этаже, установлен сферический контейнер. Это по существу копия первого спутника. Правда, мощность передатчиков здесь значительно повышена, что позволило принимать сигналы вне зависимости от состояния ионосферы на расстояниях более 15 тыс. *км*, т. е. даже тогда, когда спутник был на другой стороне земного шара!

Огромный вес полезного груза (508,3 *кГ*), поднятый ракетой, позволил поместить на спутнике и контейнер с собакой. Весят они не так уж много. Но живому существу нужно обеспе-

чить подходящую температуру, воздух, питание и т. д. А для того, чтобы снабдить его всем этим, необходимы сложные устройства.

Системы кондиционирования воздуха в герметических кабинах, применяемые на подводных лодках и высотных самолетах, оказались непригодными — уж слишком они тяжелы и громоздки. Кроме того, надо было наладить принудительную циркуляцию воздуха.

Все эти задачи были решены при помощи автоматических приборов. Они вовремя «проветривали» контейнер, перемешивали воздух, поддерживали нормальную температуру, кормили и поили собаку и обеспечивали удаление продуктов жизнедеятельности животного. Вместо тяжелых баллонов с жидким кислородом в контейнер поместили высокоактивные химические соединения, выделяющие кислород. Другие химические соединения поглощали избыток водяных паров, углекислоту и аммиак, образующиеся в процессе жизнедеятельности животного.

Таким образом, в кабине с помощью особых устройств (системы регенерации) обеспечивалось нормальное атмосферное давление, поддерживалось содержание кислорода в пределах 20—40% и углекислого газа не выше 1%. Данные, полученные со спутника по радио, показали, что кислород выделялся в достаточном количестве, а давление в кабине не снижалось. Результаты испытаний в Космосе подтвердили герметичность и надежность первого космического жилья.

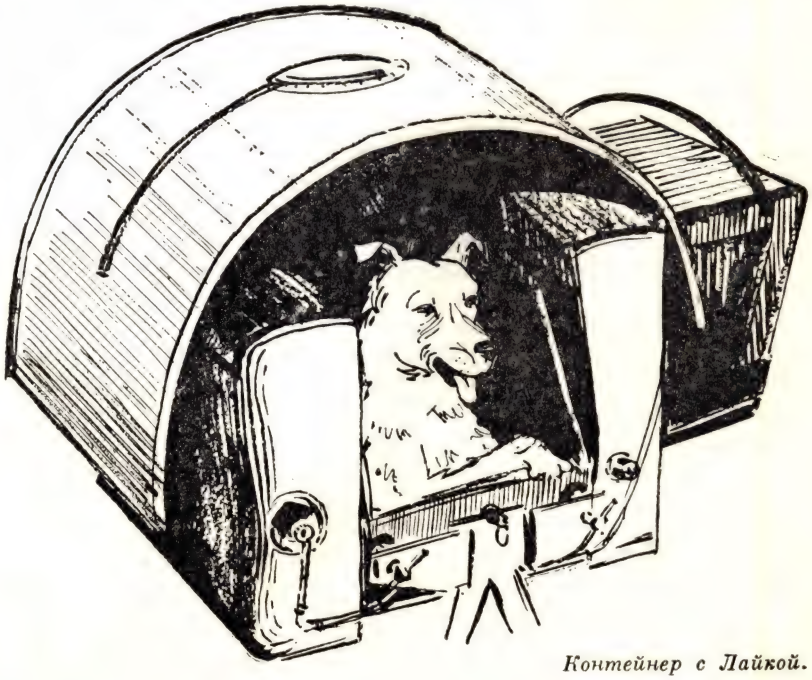
А как обеспечить Лайку водой, питанием? Ведь в ракете воду нельзя налить в блюдечко: она соберется в шар и будет висеть в воздухе или растечется, смачивая стены. Из резервуара она сама не выльется, ее нужно выдавливать. Если просто положить перед Лайкой мясо, то в условиях полета спутника этот желанный кусок будет свободно перемещаться по всему контейнеру. Больше того, если собака станет прыгать за мясом, с «земным» усилием отталкиваясь от пола, то она может разбиться о стенки или потолок. Ведь на спутнике она ничего не весит, а масса ее осталась той же. Поэтому движения Лайки были ограничены, а поили и кормили ее специальные приборы по строгому расписанию.

В корпусе ракеты располагались также приборы для изучения космических лучей и основная часть источников питания. Одно только помещение для собаки со всеми вспомогательными приборами и механизмами потребляло значительное количество электроэнергии. А ведь, кроме того, батареи должны были питать физические измерительные приборы и аппаратуру телеметрии. Поэтому мощные передатчики, расходовавшие много энергии, перестали работать на втором спутнике в три раза быстрее, чем на первом.

Приборы, регистрирующие космическое излучение, позволили провести исследования, которые другими средствами невозможно было осуществить,— исследования космического излучения, так сказать, в первоначальном виде — до взаимодействия с земной атмосферой.

Рассказывая о приборах для измерения интенсивности космических лучей, мы все время называем их частицами. Нет ли тут ошибки? Да, есть. Но не в слове «частицы», а в слове «лучи».

Еще в 1937 г., исследуя различное отклонение космических лучей магнитным полем Земли у полюсов и у экватора, советский физик, член-корреспондент Академии наук СССР профессор С. Н. Вернов доказал, что космические лучи — это не электромагнитные волны, а поток заряженных частиц самых различных энергий,



Контейнер с Лайкой.

намного превосходящих энергии частиц, разгоняемых в самых мощных современных ускорителях.

Особенно ценно, что спутник позволяет непрерывно контролировать изменения количества частиц на различных широтах и сопоставлять эти изменения с процессами, происходящими на Солнце, и с состоянием магнитного поля Земли.

Очень сложны и приборы по изучению солнечной радиации. Все видели, наверное, как бесцветный луч Солнца, пройдя сквозь трехгранную призму, разлагается в спектр. Каждому цвету спектра соответствует определенная длина волны. Самые коротковолновые в видимом спектре — фиолетовые лучи, самые длинные — красные.

Но в состав солнечного спектра входят также и невидимые лучи. Они располагаются за красной границей (инфракрасные) и перед фиолетовой (ультрафиолетовые). Видимая часть солнечного спектра изучена подробно. Но в земных условиях невозможно изучить весь спектр электромагнитных колебаний. Коротковолновая часть ультрафиолетового излучения поглощается озоном на высоте 15—35 *км*. Не изучены также испускаемые Солнцем рентгеновские лучи.

Важность изучения этой части солнечных лучей несомненна. Именно они, так же как и корпускулярные частицы, излучаемые Солнцем, оказывают мощное воздействие на верхние слои земной атмосферы. Собственно, они-то и создают ионосферу (см. статью «Физические основы радио»).

Но интенсивность этих излучений Солнца подвержена сильным изменениям. В результате состояние ионосферы все время меняется. Поэтому и нужны не искаженные земной атмосферой данные о солнечном излучении, а получить их на поверхности Земли невозможно.

Анализ солнечных лучей обычно производят при помощи фильтров, выделяющих волны определенной длины. Фильтры представляют собой пластинки из стекол особого состава. Иногда используются органические или тонкие металлические пленки, нанесенные на прозрачное стекло.

Светофильтры второго спутника — это пластинки различной толщины из алюминия, бериллия, фтористого лития и полиэтилена. Каждый фильтр пропускает лучи только определенной длины волны. Таким образом, весь излучаемый спектр разбивается на узкие полоски, соответствующие определенным длинам волн. Каждую из них изучают с помощью фотоэлемента.

Для этой цели на втором спутнике были применены так называемые фотоумножители — сложные электровакуумные приборы, способные уловить ничтожные количества лучистой энергии. А это как раз и необходимо, потому что общая энергия всего коротковолнового излучения Солнца в десятки тысяч раз меньше энергии солнечных лучей видимой части спектра.

Так впервые в истории науки ученые получили возможность изучать весь спектр солнечного излучения.

ТЕЛЕМЕТРИЯ

После запуска второго искусственного спутника в кратких сообщениях ТАСС замелькало слово «телеметрия».

Что это такое? Что означает слово, составленное из двух греческих слов: «теле»— далеко и «метрейн» — измерять?

Все данные, добытые на спутнике приборами, должны быть восприняты и обработаны какими-то устройствами, приспособленными для передачи по радио, а на Земле — приняты и расшифрованы, т. е. переведены в понятные человеку числовые величины.

Тут-то и появилась телеметрия — отрасль радиотехники, обеспечивающая измерение различных величин на расстоянии. Первые ее устройства — так называемые д а т ч и к и. Они преобразуют каждую измеряемую величину в электрическое напряжение, которое меняется вслед за изменениями этой величины.

Что представляют собой эти щупальца телеметрии, как, например, они передадут биение сердца? Сердце, очевидно, можно было бы прослушать по телефону. Для этого нужно только приложить микрофон телефонной трубки прямо к грудной клетке. Но это весьма громоздкий аппарат. Сейчас его с успехом заменяют пьезоэлектрические датчики.

Оказывается, некоторые кристаллы обладают любопытными свойствами. Если определенным образом вырезать из них пластинку, то при сжатии на ее краях появляются электрические заряды. Стоит приложить к кристаллу металлические контакты и замкнуть цепь, как по проводам потечет ток, величина и напряжение которого зависят от степени сжатия пластинки (подробнее о пьезоэлектричестве см. в статье «Звук и ультразвук»).

Пьезоэлектрические датчики очень чувствительны и, что особенно важно, обладают крошечными размерами. Вот такой-то плоский пьезокристалл и можно укрепить в любом месте живого тела: на грудной клетке, около кровеносного сосуда и т. д. Его можно ввести даже внутрь организма.

Не менее просты датчики температуры, так называемые термопары. Размером с булавочную головку, они поместятся где угодно — под кожей собаки или в оболочке спутника. Термопара — это две спаянные крупинки разных металлов. В зависимости от температуры спая в нем возникает электрический ток различной величины. При помощи термопары можно очень точно измерять температуру.

Итак, датчики создают напряжение, пропорциональное измеряемым величинам.

Следующее звено телеметрической системы — коммутатор-модулятор. Это устройство коммутирует —подключает по очереди — все датчики к модулятору, который в свою очередь, в соответствии с величиной полученного от датчика напряжения, меняет что-нибудь в радиосигнале: частоту сигнала, длительность импульса, его амплитуду или промежуток между импульсами. Модулятор как бы накладывает сообщение на радиосигнал. Благодаря этому передатчик не просто излучает волну в 7,5 или 15 *м*, а посылает на Землю радиосигнал, несущий заложенную в него информацию.

Измерители температуры, пульса, давления крови, ритма дыхания собаки, а также давления воздуха в контейнере, температуры внутри него, температуры наружных стенок и т. д. дают сравнительно медленно меняющиеся уровни напряжения. Значения этих уровней можно передавать с небольшими перерывами, так как за доли секунды они заметно не изменяются.

От антенны передатчика в эфир побежит радиоволна, но не непрерывная, а состоящая из отрезков разной длины. Пройдя несколько тысяч километров, ослабленная атмосферой, часть излученного прерывистого сигнала попадет на антенну наземного приемника. Здесь, после усиления, сигнал поступает на демодулятор. Это дешифратор, который разгадывает, расшифровывает сигнал. Принцип работы демодулятора заключается в том, что он в зависимости от длительности импульса радиосигнала выдает различный уровень напряжения.

Значения измеренных и переданных величин записывают на фото- или магнитную пленку. Кроме того, на пленку наносятся «метки времени», по которым можно определить время и продолжительность данного измерения.

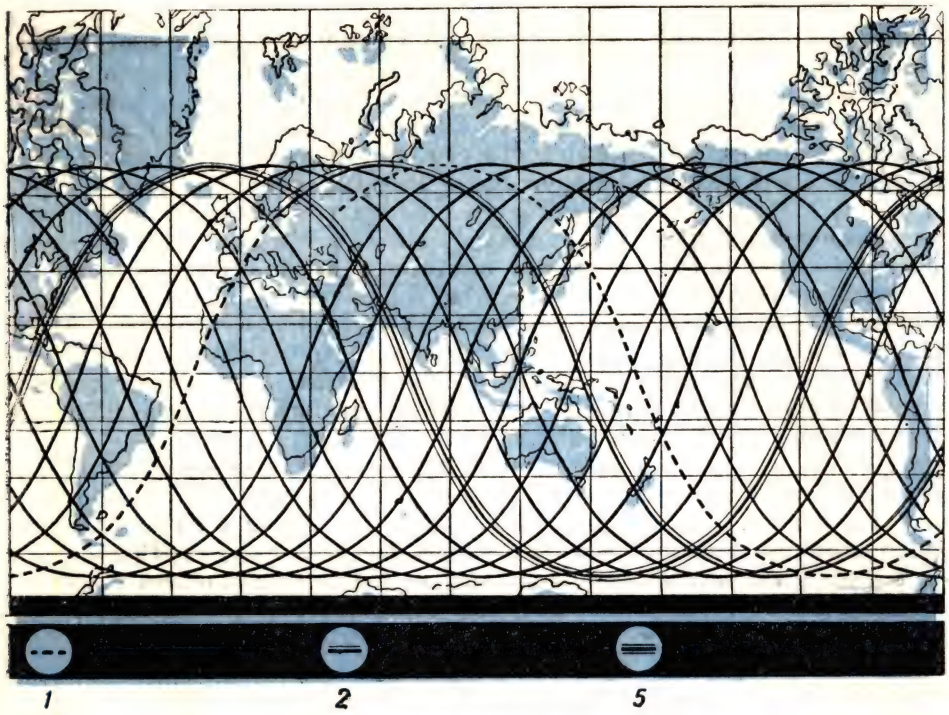
При визуальном наблюдении сигналы подают на осциллоскоп, на экране которого, как в телевизоре, видно изображение неровного забора. Каждый его столбик соответствует определенному каналу. Разного размера зеленые палочки-столбики выстроены в один ряд по номерам своих каналов. По их высоте специалисты сразу могут судить об измеряемой величине. Если смотреть, например, на столбик пульсов, будет видно, как он бьется, а вершина столбика ритма дыхания будет медленно ходить вверх и вниз.

Датчики передают важные сведения не только от приборов спутников и исследовательских ракет. Они установлены и на самих ракетах. Ни один запуск ракеты не должен пропасть даром для науки. На изучении опыта предыдущих запусков совершенствуются последующие. Здесь нужны разветвленные телеметрические системы. Работа двигателей, насосов, гигроскопов, системы управления, температура и скорость газов в сопле и камере сгорания, давление и температура горючего в баках, температура обшивки, моменты включения двигателей и отделения ступеней — все находится под бдительным контролем датчиков, передается на Землю, записывается и подробно изучается.

Можно смело утверждать, что без радио, телеметрии и электроники не было бы и современных ракет!

ТРАЕКТОРИЯ ЗАПУСКА И ОРБИТЫ СОВЕТСКИХ СПУТНИКОВ

Приблизительная картина вывода первого спутника на орбиту такова: поднявшись вертикально на несколько километров, ракета начала наклоняться, описывая заданную эллиптическую дугу. Система управления постепенно наклоняла ракету к горизонту. Под углом примерно 45° она прошла основную часть атмосферы и поднялась до высоты 60—80 *км*. Двигатель первой ступени был выключен значительно ниже и вместе с корпусом сброшен вниз. Немедленно включился двигатель второй ступени. Скорость непрерывно возрастала. Наконец, отработал и выключился двигатель предпоследней ступени, и ракета продолжала полет по инерции, пока ее последняя ступень не достигла наивысшей точки. Тут включился ее двигатель, который и сообщил спутнику максимальную скорость.



Траектории первого советского спутника в начале первой недели полета.

После того как выключился двигатель последней ступени, ракета-носитель и прикрытая защитным колпаком искусственная луна стали спутниками Земли. Прижатые к корпусу последней ступени, 4 антенны распрямились, включилось электропитание приборов — спутник ожил.

На высоте нескольких сот километров понеслись в пространство, удаляясь от Земли, три предмета: сбоку — части защитного конуса, впереди — спутник, а за ним—ракета-носитель.

Хотя плотность воздуха на такой высоте ничтожна, но беспорядочно вращающийся защитный конус встретил наибольшее сопротивление разреженных частиц атмосферы и быстро отстал. Ракета и спутник несколько дней держались почти рядом. Но постепенно громозная ракета-носитель тоже стала отставать, причем, хотя она и тормозилась, скорость ее не уменьшалась, а, наоборот, увеличивалась. Почему? Согласно закону сохранения момента количества движения, для тел, движущихся подобно нашему спутнику, при уменьшении радиуса орбиты скорость должна расти. Чем ниже опускалась ракета-носитель, тем больше должна была быть ее скорость, чтобы она могла держаться на круговой орбите. А так как ракета тормозилась все-таки очень медленно, она, понемногу снижаясь, наращивала свою скорость. Через неделю она обошла спутник на 1000 *км*, а через 23 дня — уже сделала на один оборот больше. Период ее обращения вокруг Земли уменьшился. С каждым днем она снижалась все быстрее, и, как было сказано выше, 1 декабря 1957 г. ее полет окончился.

Первый советский спутник Земли был запущен по орбите, плоскость которой была наклонена к плоскости экватора под углом 65°. Такой большой угол наклона определил многие интересные особенности его движения. Если взглянуть на развернутую карту мира, то сразу бросается в глаза, что трасса спутника имела вид винтообразной линии и проходила где-то между северным и южным полярными кругами. Отчего так получилось?

Прежде, однако, уясним, что орбита спутника неподвижна относительно звезд. На Землю как бы надет обруч, внутри которого она вращается и в своем движении увлекает его вокруг Солнца. Угол наклона этого обруча-орбиты в межзвездном пространстве практически не меняется.

Итак, спутник обращается по неподвижной орбите, а Земля вращается внутри ее с запада на восток, как бы подставляя спутнику свои бока для обозрения.

Возьмем глобус и представим себе, что спутник начал свой полет над Москвой. Сначала он летел от Москвы на северо-восток, к северным отрогам Урала. Затем он «коснулся»65-й параллели и, обогнув Урал, начал двигаться «вниз»— на юго-восток. Пройдя над сибирской тайгой, космический гонец Советской страны вышел через север Японии к Тихому океану, спустился к экватору, пересек его, прошел восточнее Новой Зеландии, обогнул крайнюю точку Южной Америки и снова начал «подниматься» к северу. «Поднявшись» вдоль Южноамериканского материка вверх к экватору и «коснувшись» западного края Африки, спутник пролетел над Испа-

нией и Францией и снова вышел на широту Москвы.

Но Москвы «на месте» не оказалось: вместе с Землей она за это время передвинулась на 1500 *км* к востоку. Поэтому спутник вышел значительно западнее Москвы — под ним лежала Дания. И только через 15 оборотов спутник снова — через Африку, Италию, Албанию — подошел с юга к столице нашей Родины.

Свой четвертый круг спутник завершил над северными берегами Канады, недалеко от Гренландии. А начав пятый, он пролетел над Исландией, пересек Скандинавский п-ов и, «задев» Финляндию, стал приближаться к Москве, но на этот раз с севера. Это произошло потому, что Москва теперь оказалась под той частью орбиты, где спутник, достигнув верхней для Северного полушария точки, начал спускаться к южным широтам. Таким образом, мы видим, что спутник мог пролетать над одним и тем же пунктом в разных направлениях.

Не удивительно также и то, что проекция траектории спутника на земной шар — не прямая линия. Он прочертил свой путь в виде волнистой линии. Это результат одновременного вращения Земли и спутника в разных плоскостях. Но, кроме того, и сама орбита его не оставалась неизменной.

Сначала наш первый спутник совершал один оборот за 1 час 36,2 мин. Таким образом, за сутки он делал немногим менее 15 оборотов. Точнейшими измерениями было установлено, что за каждые сутки период обращения первого спутника уменьшался всего на 2,94 сек. Такое незначительное изменение говорит, что он снижался очень медленно, причем сначала уменьшалась только максимальная высота его орбиты (апогей), а сама орбита постепенно приближалась к круговой.

Если бы орбита спутника с самого начала была круговой, то он совершал бы свой полет на высоте 558 *км*. Но орбита нашего первого спутника оказалась эллиптической, и крайние ее точки — наибольшего и наименьшего подъема — располагались соответственно на высоте 228 и 950 *км*.

Почему же первый спутник начал путешествовать по эллипсу?

Вспомним: чтобы спутник начал движение по круговой орбите, его скорость в момент отделения от ракеты-носителя должна строго соответствовать круговой скорости для данной высоты, а направление движения должно быть точно горизонтальным. А наш спутник получил несколько бóльшую скорость, поэтому сила притяжения Земли не сумела сразу отклонить его от начального направления, и он начал удаляться от нашей планеты. Но, чтобы окончательно победить силу тяготения, его скорость оказалась недостаточной, и спутник стал обращаться вокруг земного шара по эллипсу.

Разумеется, получить вместо круговой орбиты эллиптическую очень выгодно. Ведь в данном случае ракета располагала запасом скорости, который позволил поднять наивысшую точку орбиты (апогей) на значительную высоту — 950 *км*. Благодаря этому явлению приборы спутника могли вести исследования не на одной высоте, а в значительной толще атмосферы.

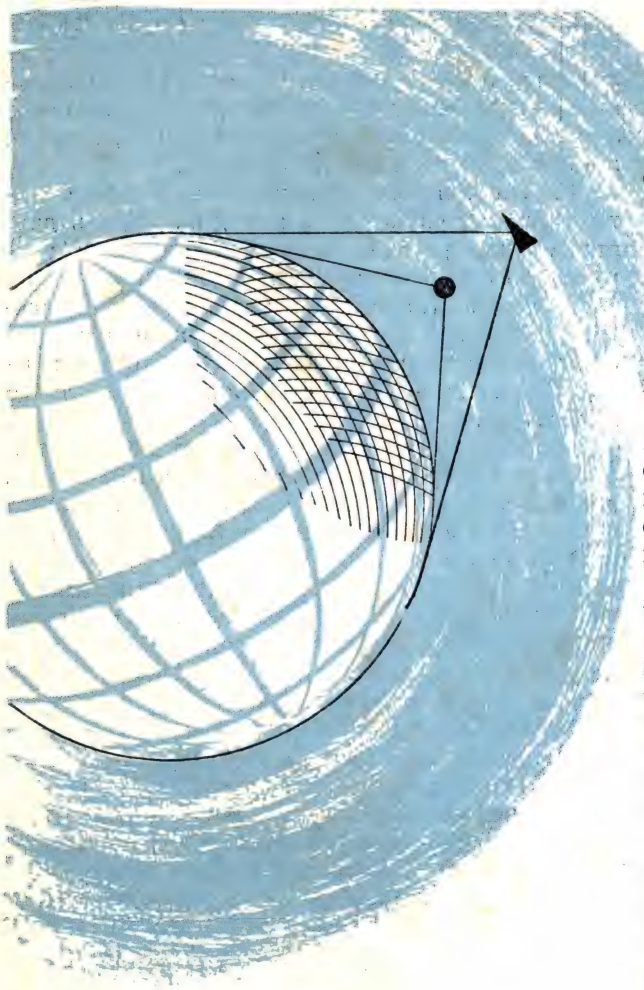
Ближе всего первый спутник подходил к Земле в Северном полушарии, а в Южном он поднимался над нашей планетой на высоту свыше 900 *км*. Отсюда он «видел» площадь диаметром более 6000 *км*, а на высоте 300 *км* эта площадь уменьшалась почти в два раза. Но раз спутник «видел» такое большое пространство, то и его можно было рассматривать со столь же большой территории. Не удивительно поэтому, что на нашей планете между полярными кругами, где путешествовал спутник, через несколько дней не осталось места, над которым бы он не побывал.

За первую неделю спутник совершил 105 оборотов вокруг Земли. Он 210 раз пересек экватор. Значит, точки прохождения спутника над экватором находились на расстоянии всего 195 *км* друг от друга, а на высоких широтах траектории спутника располагались еще ближе.

Второй советский искусственный спутник Земли был гораздо больше первого, а его ракета-носитель — более мощной: 500 *кГ* полезного груза, заброшенного на высоту 1670 *км*, говорят сами за себя!..

Значительно бóльшая скорость разгона по орбите обеспечила ему почти вдвое бóльшую высоту подъема. Напомним, что на тех высотах, где разгонялась ракета, чтобы стать спутником и летать по круговой орбите, достаточно скорости около 7600 *м/сек*. А второй спутник развил скорость более 8000 *м/сек*, т. е. у него был очень значительный запас скорости. Это и сделало эллиптическую орбиту второго спутника еще более вытянутой, чем у первого.

Большая ось этого эллипса стала длиннее, увеличилось время одного оборота спутника, который в начале своего существования обходил Землю уже не за 1 час 35 мин., а за 1 час 43,52 мин.



Чем выше летит спутник, тем больше он «видит».

Срок жизни второго спутника тоже был значительно больше, так как бóльшая часть его пути пролегала выше 450—500 *км*, т. е. там, где почти совершенно не сказывается сопротивление воздуха. И только один раз за оборот спутник входил на несколько минут в более плотную атмосферу.

Красноречивее всего это подтверждалось значительно более медленным уменьшением времени обращения вокруг Земли второго спутника. Оно составляло всего 2,3 сек. в сутки, тогда как первый спутник терял по 3 сек., а его ракета-носитель уже через 37 дней полета теряла по 9 сек. в сутки.

Орбита второго спутника также была наклонена под углом 65° к плоскости экватора. Поэтому характер его пути над поверхностью Земли не отличался от пути первого спутника.

ТРЕТИЙ СОВЕТСКИЙ СПУТНИК ЗЕМЛИ

15 мая 1958 г. на орбиту вышел третий советский искусственный спутник Земли. Долгие годы не сгладится впечатление, которое он произвел на весь мир своим огромным весом и многочисленным и разносторонним научным оснащением.

Газеты всего мира запестрели броскими и волнующими заголовками: «Гигантский третий спутник на орбите», «Красная луна весом в полторы тонны», «Россия выстрелила гигантским спутником», «Спутник в сто раз больше нашего»...

Этот новый блестящий триумф советской науки и техники—яркое свидетельство их неоспоримого превосходства и прежде всего ракетной техники и радиоэлектроники. Успехи эти не случайны. Они базируются на огромной индустриальной мощи Советского Союза и подготовлены всем предшествующим развитием социалистического общества, его экономики и культуры.

Третий советский спутник Земли — крупнейшее достижение в развитии исследований космического пространства. Это огромная летающая лаборатория, поистине «космический комбайн», как назвал его советский ученый акад. А. А. Благонравов.

Принципиально третий спутник ничем не отличается от своих первых собратьев. Но с технической и научной точки зрения это огромный шаг вперед. Прежде всего подняты в Космос и выведены на орбиту 1327 *кГ* полезного веса! Чтобы отчетливее себе представить, что это такое, скажем, что это вес автомобиля «Волга».

Орбита его еще более вытянута и удалена от поверхности Земли, т. е. охватывает еще бóльшую часть межпланетного пространства. Сразу после запуска высшая ее точка находилась в 1880 *км* над Землей — в два раза выше, чем у нашего первого спутника. Уже одно это показывает, насколько выросла мощь советских баллистических ракет.

Поздно вечером 31 января 1958 г., через два месяца после первой попытки и через четыре

Таблица 15. Первые космические путешественники высадились на Луне.

месяца после запуска первого советского спутника, с полигона, расположенного на побережье Флориды, стартовала американская 30-тонная ракета. Четвертая ступень ее стала третьим искусственным спутником Земли и первым, запущенным американцами.

Свой первенец американцы назвали «Эксплорер» («Исследователь»). Он представляет собой тонкий металлический цилиндр, похожий на артиллерийский снаряд, длиной 2 *м*, а диаметром всего 15 *см*. Общий вес спутника 13,365 *кГ*, вес научных приборов — 4,5 *кГ*.

«Эксплорер» нес на борту два очень маломощных радиопередатчика, счетчик Гейгера для регистрации космических лучей, термопары для измерения внутренней и наружной температуры, пьезопластинки для регистрации метеоритов и батареи электропитания, которые должны были обеспечить двухнедельную работу одного передатчика и двухмесячную работу другого.

С каждым разом все выше взлетают советские спутники.

Запущенный вскоре второй американский спутник не мог идти в сравнение даже со своим первым собратом, так как весил всего 1,5 *Г* и представлял интерес в основном для конструкторов ракеты «Авангард», доказавших, в конце концов, что эта ракета все-таки может вывести спутник на орбиту.

Третий американский спутник не представлял собой ничего оригинального, это точная копия первого. Весил он на 600 *Г* больше первого американского и почти в 100 раз меньше третьего советского спутника.

Весьма небольшими оказались и четыре других спутника, запущенных во Флориде. Лишь восьмой американский спутник имел «ощутимый» полезный вес — 67,5 *кГ*, но и он не превысил размеров первого советского искусственного спутника Земли. Только в июле 1959 г. американцам удалось вывести на орбиту спутник, имеющий солидный вес — 770 *кГ*.

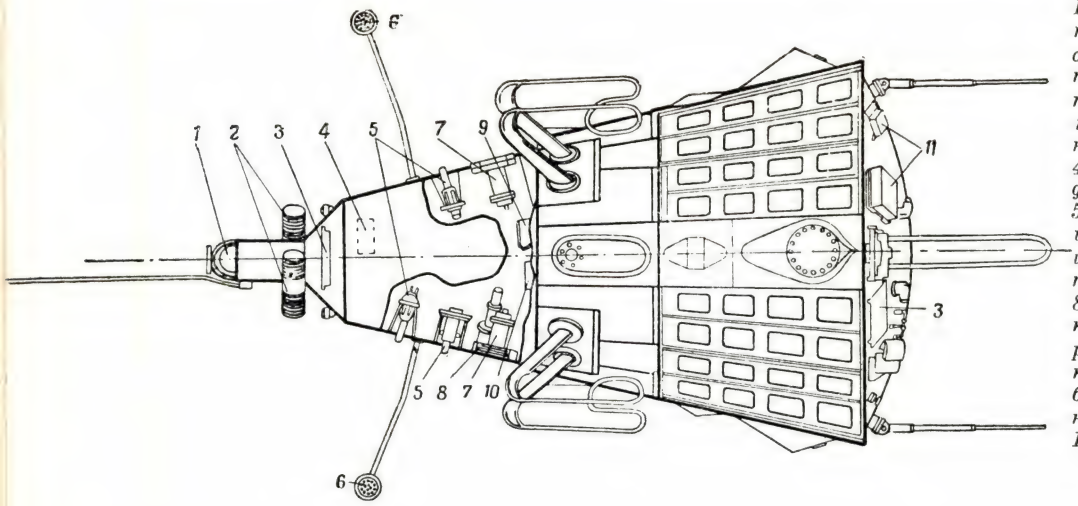
Размеры американских спутников ограничиваются, разумеется, мощностью ракет. Этим же объясняется и тот факт, что угол наклона к экватору плоскости орбиты первых трех американских спутников составлял всего 35°. Четвертый спутник был запущен под углом 51°, а пятый, «полярный»,— перпендикулярно экватору через полюсы Земли.

Каждый новый спутник, даже самый маленький, в известной степени обогащает науку. Но для фундаментального изучения космического пространства единственное радикальное средство — это искусственные спутники большого веса.

В Москве в павильоне Академии наук на Выставке достижений народного хозяйства СССР внимание посетителей привлекает огромный блестящий конус из светлого металла, раскинувший во все стороны щупальца многочисленных приборов и антенн. Это третий советский искусственный спутник Земли. Нельзя без восторженного волнения смотреть на это величайшее творение человеческого гения, сконцентрировавшее и отразившее в себе все величайшие достижения научно-технической мысли нашего времени.

Корпус спутника изготовлен из специальных алюминиевых сплавов. Поверхность его отполирована и обработана таким образом, чтобы обеспечить хорошее отражение солнечной

Таблица 16. Фотонная ракета.



Приборы, установленные на третьем искусственном спутнике Земли: 1 — магнитометр; 2 — фотоумножители для регистрации корпускулярного излучения Солнца; 3—солнечные батареи; 4 —прибор для регистрации фотонов в космических лучах; 5 — магнитный и ионизационные манометры; 6 — ионные ловушки; 7 — электрические флюксметры; 8 — масс-спектрометрическая трубка; 9 —прибор для регистрации тяжелых ядер в космических лучах; 10—прибор для измерения интенсивности первичного излучения; 11 — датчики для регистрации микрометеоритов.

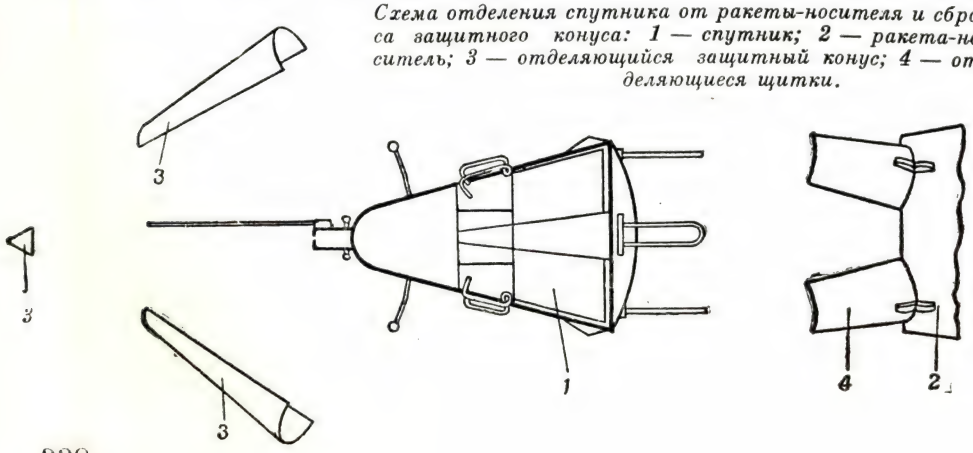
радиации. Огромный трехметровый конус полностью герметизирован и заполнен азотом, который перемешивается специальным прибором и выравнивает температуру внутри. Система терморегулирования значительно усовершенствована по сравнению с системами первых спутников. На нижней части его боковой поверхности установлено 16 поворотных секций-пластин. Их легко различить на рисунке, так как для увеличения прочности они проштампованы большими прямоугольниками. Секции могут поворачиваться и становиться на ребро. Тогда под ними обнажается матовая поверхность с меньшим коэффициентом отражения, благодаря чему спутник сильнее нагревается солнцем. Угол наклона секций регулируется аппаратурой в зависимости от температуры внутри корпуса.

Внутри спутника установлено несколько легких, но прочных, связанных с оболочкой рам. Они отлиты из магниевых сплавов и служат для установки и крепления многочисленных приборов.

У днища корпуса расположена радиотелеметрическая аппаратура, радиоаппаратура для измерения координат спутника, программно-временное устройство, аппаратура системы терморегулирования, автоматы, включающие и выключающие аппаратуру, и, наконец, источники электропитания.

На другой приборной раме, в передней части корпуса, размещена основная часть приборов для научных исследований вместе со своими источниками электропитания. Это радиопередатчики, электронная часть аппаратуры для различных измерений: давления, ионного состава воздуха, концентрации положительных ионов, напряженности магнитного поля и величины электрических зарядов, интенсивности корпускулярного излучения Солнца. Чувствительные элементы этих приборов — датчики — расположены в основном на поверхности спутника. Внутри размещены только некоторые датчики температуры и счетчики космических частиц, обладающих, как известно, всепроникающей способностью. В цилиндрических стаканах, приваренных к оболочке передней части корпуса, установлены два ионизационных и один магнитный манометр. Почти в метре от спутника на тонких

Схема отделения спутника от ракеты-носителя и сброса защитного конуса: 1 — спутник; 2 — ракета-носитель; 3 — отделяющийся защитный конус; 4 — отделяющиеся щитки.



трубчатых стержнях, шарнирно закрепленных на оболочке, подвешены два полых сетчатых шара. Это ионные ловушки, измеряющие концентрацию положительных ионов на трассе движения спутников. Во время старта они были прижаты к корпусу, и только на орбите под действием пружин стержни повернулись и стали перпендикулярно.

Снаружи около стаканов манометров установлены два электростатических флюксметра, служащих для измерения электрического заряда и напряженности электростатического поля. Тут же находится трубка радиочастотного масс-спектрометра, который определяет состав ионов на больших высотах.

Фотоумножители, служащие для регистрации корпускулярного излучения Солнца, установлены у вершины конуса. А в самом острие размещен магнитометр, так как он должен быть удален от остальных приборов и, главное, от больших масс металла, составляющих конструкцию спутника.

На днище конуса закреплены четыре датчика для регистрации ударов микрометеоритов, а также одна из секций солнечной полупроводниковой батареи. Четыре малые секции установлены у носа и еще четыре — на боковых поверхностях. При таком размещении энергия непрерывно поступает к электроприборам, как бы ни «поворачивался» спутник, лишь бы его освещало Солнце.

Солнечная батарея превращает энергию солнечных лучей непосредственно в электрическую. Пластинки из чистого кремния, образующие полупроводниковые фотоэлементы, соединяются в батареи. Каждый элемент создает напряжение только 0,5 *в*. Но соответствующее соединение многих элементов позволяет получить значительные напряжения.

На спутнике солнечные батареи прошли проверку и испытание на «срок службы», который, впрочем, может быть сильно сокращен микрометеоритами, разрушающими поверхность кремниевых элементов.

Во все стороны от корпуса смотрят многочисленные радиоантенны в виде различных прямых штырей и трубчатых конструкций сложной формы. Мощный передатчик на волне 15 *м* непрерывно излучает короткие радиосигналы. Он установлен в основном для того, чтобы привлечь широкие круги научной общественности всего мира к наблюдениям за спутником. Систематическая регистрация радиолюбителями его сигналов и особенно запись их на магнитофонные ленты имеют большое значение. Передачу чисто научных данных осуществляет многоканальная радиотелеметрическая система.

Телеметрическая система третьего спутника может передать за небольшой промежуток времени огромное количество научных данных. Это особенно необходимо потому, что множество измеренных величин от датчиков всех приборов нужно передать за время прохождения над советскими наблюдательными центрами. По этой же причине данные измерений, проведенных в разных точках орбиты, в том числе и на другой стороне земного шара, «запоминаются» специальными устройствами. И, когда спутник проходит над измерительной станцией, они по команде с Земли с большой скоростью передаются в эфир.

Для вычисления координат спутника используют электронные счетные машины. Данные со всех наблюдательных пунктов по специальным линиям связи передаются в общий координационно-вычислительный центр, где их автоматически вводят в быстродействующие счетные машины, которые и вычисляют основные параметры орбиты. Этот сложный комплекс электронных и радиотехнических устройств обеспечивает быстрое и точное определение координат летающей лаборатории.

Какие же научные сведения передавали на Землю телеметрические устройства третьего спутника? Во-первых, на нем проводились непосредственные измерения ионосферы: регистрировалась концентрация заряженных частиц и определялась масса и относительное количество различных ионов. По этим данным можно сделать выводы о химическом составе ионосферы.

При измерении концентрации ионов и спектров их масс необходимо учитывать электрический заряд самой летающей лаборатории. Для этой цели на спутнике используются два специальных прибора — флюксметры. Они позволяют, кроме заряда спутника, измерить напряжение электростатического поля вблизи него.

Проведенные одновременно, все эти измерения составляют единый комплекс опытов, позволяющий значительно расширить наши познания о строении ионосферы. Выяснено, например, что концентрация электронов после определенного максимума падает медленнее, чем растет до него. Оказалось, что число электронов во внешней части ионосферы в 3,6 раза больше, чем в нижней. Эти же измерения позволили высказать соображение, что высота границы атмосферы, где она соприкасается с межпланетным газом, лежит на высоте 2—3 тыс. *км*.

Изучение ионосферы имеет первостепенное значение также и для решения проблемы надежной радиосвязи Земли с исследовательскими космическими ракетами и спутниками будущего.

Благодаря установке магнитометра на третьем спутнике созданы исключительные возможности для изучения магнитного поля Земли. В короткий срок производится магнитная съемка практически всего земного шара.

Эти измерения особенно ценны тем, что представляется возможность определить величину быстрых колебаний напряженности магнитного поля, источники которых находятся вне Земли, в верхних слоях атмосферы. Непосредственное измерение картины распределения магнитного поля Земли на больших высотах позволит также выяснить, почему распределение магнитного поля больших высот, вычисленное по магнитным наблюдениям у поверхности Земли, не совпадает с вычислениями, проведенными по наблюдениям отклонений космических лучей.

Вращение спутника потребовало создания специального самоориентирующегося магнитометра. Измерительный датчик его автоматически «смотрит» вдоль линий магнитного поля, какое бы положение ни занимала ось спутника относительно Земли. Кроме того, еще два датчика по положению подвижной части прибора позволяют определить положение корпуса и скорость его вращения вокруг собственных осей. Это в свою очередь дает возможность оценить силы, вызывающие вращение спутника, и построить спутник, полностью ориентирующийся в пространстве, что необходимо для более совершенных измерений и желательно для полета людей.

Много внимания на третьем спутнике уделено аппаратуре для изучения природы и происхождения космических лучей. Существует гипотеза, согласно которой в составе космических лучей имеются фотоны высокой энергии — излучение, родственное видимому свету, но с гораздо меньшей длиной волны. Называют его гамма-лучами. Их испускают, например, ядра распадающихся радиоактивных атомов. Если это излучение будет найдено в составе космических лучей, то тем самым будет открыт новый метод исследования Вселенной. Определить, где рождаются космические лучи, где их источник, можно, только установив направление движения гамма-лучей, потому что другие космические частицы сильно отклоняются в магнитных полях и быстро теряют свое первоначальное направление, тогда как гамма-лучи, подобно свету, распространяются прямолинейно.

Огромное значение имеет исследование первичных космических лучей, еще не столкнувшихся с атомами газов земной атмосферы. Ведь даже небольшой слой ее сильно изменяет их состав. Полностью, например, поглощаются гамма-лучи, а также наиболее тяжелые частицы из состава космического излучения. Поэтому, кроме счетчика космических частиц, на спутнике установлен прибор, позволяющий определить состав первичного космического излучения. Ответ на этот вопрос также поможет узнать, где и как возникают эти загадочные лучи.

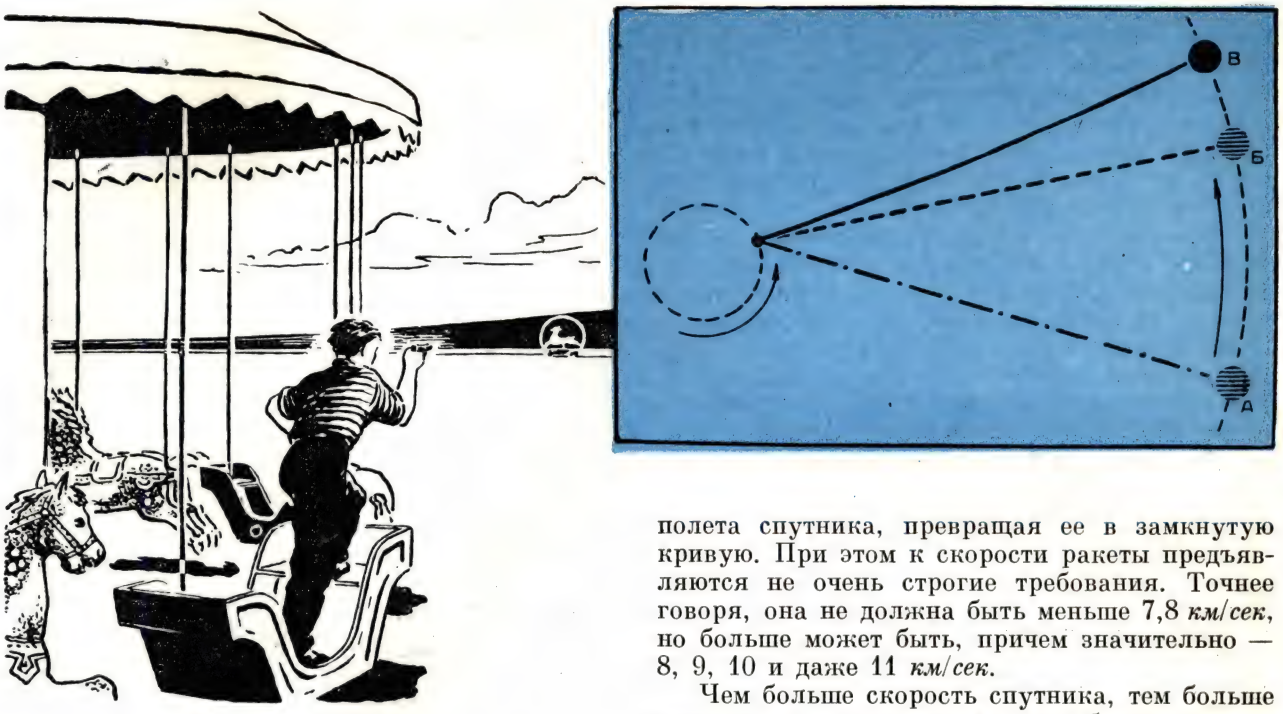
Впервые на третьем спутнике изучалось корпускулярное излучение Солнца. Два счетчика корпускул дали возможность установить, как распределяются эти частички по окружности Земли, как интенсивность их потоков меняется с высотой и временем суток. Такие индикаторы позволяют изучать и рентгеновское излучение Солнца.

Кроме новых приборов, на третьем спутнике установлены приборы, имевшиеся и на первых двух: для изучения давления и плотности высоких слоев атмосферы, ее температуры, исследований условий полета в космическом пространстве, теплового режима спутника, вероятности его повреждения метеоритами.

Обширная программа исследований, выполненная с помощью спутника, характеризует его как уникальную космическую лабораторию, равной которой нет в мире. Первое время после запуска эта космическая лаборатория обращалась вокруг Земли около четырнадцати раз в сутки, затрачивая в начале своих полетов по 105,95 мин. на оборот. Плоскость орбиты ее, так же как и первых двух, наклонена к плоскости земного экватора под углом 65°. Нельзя забыть волнующего зрелища: на фоне звездного ковра, мерцая, быстро проходит по небосводу яркая звезда, созданная советским человеком.

Средства и методы наблюдения за третьим спутником значительно усовершенствованы. Наряду с радиотелескопами-локаторами широко используются электронно-оптические преобразователи, позволяющие получить четкое изображение на огромных расстояниях. Значительно расширена сеть оптических наблюдательных станций в Советском Союзе и за рубежом.

Трудно переоценить значение запуска советской космической лаборатории, насыщенной



сложнейшей научной аппаратурой. Впервые такой разносторонний комплекс физических приборов поднят за пределы земной атмосферы. Ученые получили возможность провести научные опыты, осуществление которых ранее было принципиально невозможно.

СОВЕТСКАЯ КОСМИЧЕСКАЯ РАКЕТА

2 января 1959 г. наша страна снова изумила мир новым поразительным достижением: в Советском Союзе была запущена ракета в сторону Луны. Запуск космической ракеты — событие всемирно-исторического значения — сразу привлек к себе внимание всего человечества. Как же проходило это знаменательное событие?

Рассказывая о запуске искусственных спутников Земли, мы говорили, что их ракеты-носители взлетали вертикально. Когда ракета, пройдя наиболее плотные слои атмосферы, оказывалась на высоте 10—15 *км*, специальное автоматическое устройство отклоняло ракету от вертикали, постепенно превращая ее траекторию в эллиптическую орбиту. Когда ракета достигала расчетной высоты и необходимой скорости, двигатель последней ступени выключался.

Остальное делала, так сказать, уже сила земного тяготения: она искривляла траекторию полета спутника, превращая ее в замкнутую кривую. При этом к скорости ракеты предъявляются не очень строгие требования. Точнее говоря, она не должна быть меньше 7,8 *км/сек*, но больше может быть, причем значительно — 8, 9, 10 и даже 11 *км/сек*.

Чем больше скорость спутника, тем больше вытянется его траектория, тем больше станет период обращения, но в остальном все будет неизменно — спутник по-прежнему останется спутником, накрепко «привязанным» к Земле силой тяготения. Как бы далеко ни улетел он от Земли (а при скорости 11 *км/сек* он удалился бы почти на 200 тыс. *км*!), он неизбежно повернет обратно и продолжит свой бег вокруг Земли.

Иное дело космическая ракета. Для того чтобы достичь любого небесного тела, даже сравнительно недалекой Луны, ракета должна оборвать невидимые нити земного тяготения, управляющие полетом спутников, и пронизать космическое пространство, подвергаясь одновременному воздействию трех полей тяготения — земного, солнечного и лунного. При этом нужно иметь в виду, что действие каждого из этих полей на ракету непрерывно изменяется по силе и направлению. Ведь и Земля, и Луна с большими скоростями движутся по своим орбитам, и их расположение относительно друг друга и Солнца все время изменяется.

Сила их воздействия также непрерывно изменяется: ракета быстро движется в пространстве и, следовательно, ее расстояние до каждого из этих небесных тел также все время меняется. А сила, по закону всемирного тяготения, зависит от квадрата расстояния между телами.

Для того чтобы лучше разобраться в этом сложном вопросе, попробуем представить себе такую картину. Стрелок, находящийся на вращающейся карусели, хочет попасть в мишень, быстро движущуюся вокруг карусели. Это трудная, почти невыполнимая задача даже для очень меткого стрелка (см. рис. на стр. 341).

Почему это так трудно?

Главным образом по двум причинам. Во-первых, чтобы попасть в движущуюся мишень, нужно целиться не в нее, а в ту точку ее траектории, где окажется мишень в момент прилета пули. Значит, нужно заранее рассчитать, куда передвинется мишень за то время, что пуля будет находиться в полете, и целиться именно в эту точку.

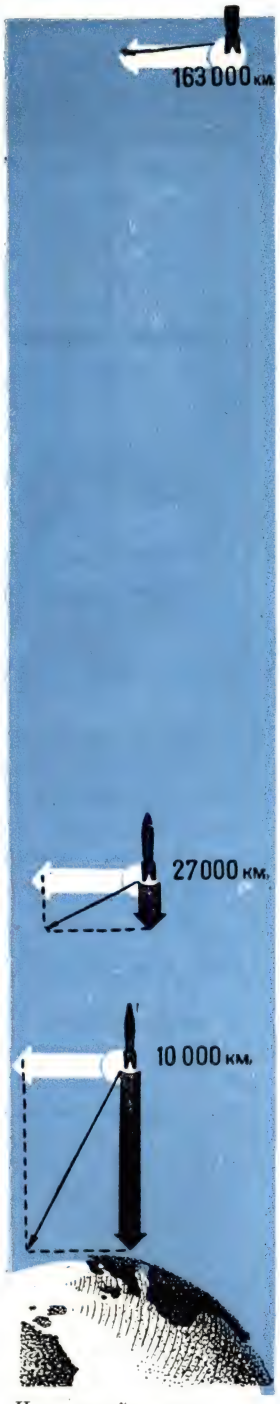
Но наш стрелок не стоит неподвижно на одном месте, поэтому его пуля с самого начала приобретет двойное движение: в сторону мишени и по кругу — под влиянием вращения карусели. Следовательно, полетит она не туда, куда целился стрелок, а куда-то в сторону, причем величина ее отклонения будет зависеть от скорости карусели. В этом вторая причина особой трудности приведенного нами примера.

Вернемся теперь к нашей космической ракете. Расчет ее траектории представляет собой еще неизмеримо более сложную задачу, чем приведенный выше пример. Если уменьшить Землю до размеров обыкновенной карусели, то Луна представилась бы шаром 2 *м* в диаметре на расстоянии 250 *м* от нее.

Наш пример далеко не отражает всех трудностей, возникающих при расчете траектории космической ракеты.

Дело состоит в том, что современная математика может рассчитать любое, самое сложное движение, происходящее вблизи земной поверхности. Так, с помощью дифференциального исчисления можно легко решить приведенную выше задачу. Но в мировом пространстве действует еще одна категория сил, имеющих решающее влияние на полет ракеты. Мы имеем в виду силы всемирного тяготения. Конечно, и в нашем примере пуля притягивается Землей, но сила эта вблизи земной поверхности постоянна и для любой системы оружия заранее известно, насколько под ее влиянием отклонится вниз точка попадания на том или другом расстоянии от стрелка.

Совсем иначе обстоит дело в случае «выстрела» космической ракетой. Согласно закону всемирного тяготения, сила притяжения Земли уменьшается пропорционально квадрату расстояния между центром Земли и ракетой. Примем радиус Земли приближенно равным 7 тыс. *км*. Тогда сила притяжения Земли на высоте 27 тыс. *км* будет в четыре раза меньше, чем на высоте 10 тыс. *км*, а на расстоянии 163 тыс. *км* от земной поверхности — уже в сто раз меньше. Вместе с тем сила притяжения Солнца практически не изменится (ведь расстояние от Земли до Луны составляет всего 0,25 процента расстояния от Земли до Солнца). Поэтому отклонение ракеты в сторону Солнца будет все время увеличиваться. В этом легко убедиться, если рассмотреть представленную здесь схему.



На разной высоте сила земного притяжения различна.

Однако, чтобы получить более полное представление о влиянии полей тяготения на траекторию космической ракеты, нам необходимо учесть еще притяжение Луны. Это мы сделали на следующей схеме.

Конечно, нужно иметь в виду, что на такой схеме нельзя точно передать ни относительные расстояния от Земли до Солнца и Луны, ни относительные размеры этих небесных тел, ни, что особенно важно, действительного соотношения сил: для этого не хватило бы размеров не только книги, но и целой комнаты. Ведь в некоторых случаях сила притяжения Солнца бывает в 1650 раз больше силы притяжения Земли! Но даже и такие приближенные схемы дают представление о том, как изменяются действующие на ракету силы.

Итак, по мере удаления ракеты от Земли сила притяжения, действующая на ракету, все время уменьшается, а сила притяжения Луны увеличивается, все больше и больше уравновешивая силу притяжения Земли. Наконец, наступает момент, когда силы притяжения Земли и Луны полностью уравновешивают друг друга и ракета отклоняется только полем тяготения Солнца. Такая нейтральная точка находится на расстоянии 35 тыс. *км* от поверхности Луны. (Заметим, что эта точка расположена на таком расстоянии от Луны только в том случае, если ракета летит по прямой, соединяющей центры Земли и Луны. Во всех остальных случаях она будет расположена значительно дальше). Пройдя эту точку, ракета с возрастающей скоростью начинает падать на Луну. Таковы те трудности, которые возникают при расчете траектории космической ракеты даже для такого сравнительно короткого и простого участка солнечной системы, как трасса Земля — Луна.

Посмотрим теперь, как протекал полет космической ракеты.

Пробив в вертикальном полете наиболее плотные слои земной атмосферы, ракета стала постепенно отклоняться от вертикали, выходя на заданную ей траекторию. Скорость ракеты при этом быстро нарастала. В конце участка разгона последняя ступень ракеты набрала расчетную скорость и автоматическая система управления выключила ракетный двигатель; после чего сила притяжения Земли стала уменьшать эту скорость. Точнее говоря, скорость ракеты расходовалась на преодоление силы притяжения Земли. Уже на высоте 100 000 *км* скорость ракеты упала до 3,5 *км/сек* и продолжала уменьшаться дальше, пока не достигла некоторой наименьшей величины, после чего снова начала расти под влиянием возрастающего притяжения Луны. Когда ракета пересекла орбиту Луны, ее скорость составляла около 2,2 *км/сек*.

Влияние полей тяготения на космическую ракету.

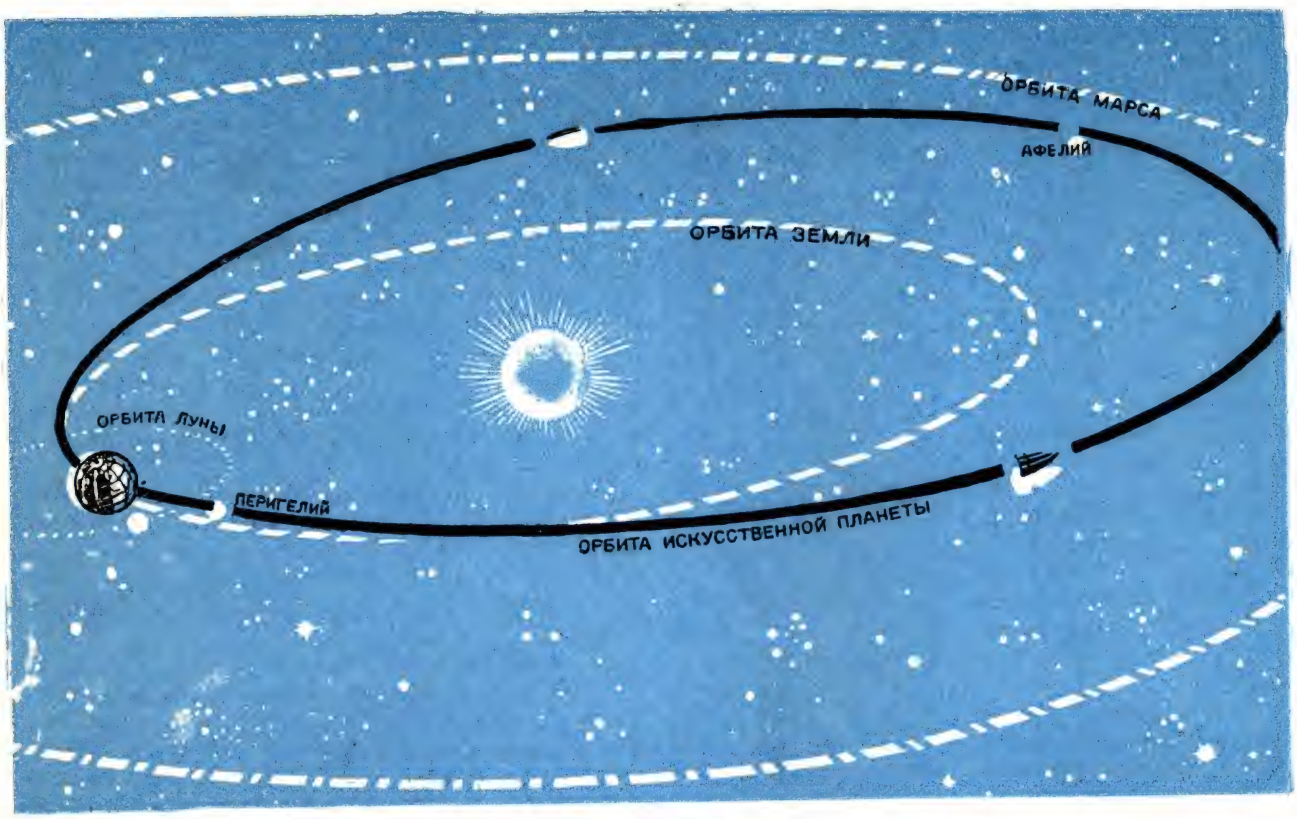
Через 34 часа полета, 4 января в 5 час.59 мин. по московскому времени, советская космическая ракета, пройдя 370 тыс. *км*, пересекла орбиту Луны и вышла в межпланетное пространство, став первым искусственным спутником Солнца.

Как же движется новая планета?

Так как 2 января Луна находилась впереди Земли с внутренней стороны ее орбиты, ракета, миновав Луну, некоторое время также находилась внутри орбиты Земли. Внутри земной орбиты ракета пробыла больше двух месяцев и прошла около 900 млн. *км*. Затем она пересекла земную орбиту и вышла в пространство, расположенное между Землей и Марсом.

Скорость движения ракеты вокруг Солнца составляет 32 *км/сек*. Эта скорость складывается из 29,8 *км/сек* (скорость движения Земли по ее орбите вокруг Солнца) и 2,2 *км/сек* (скорость, которую имела ракета в момент пересечения орбиты Луны).

Законы небесной механики позволяют точно рассчитать движение новой планеты и заранее определить положение ее орбиты. Такие вычисления уже произведены. Плоскость новой орбиты почти совпадает с плоскостью орбиты Земли. Минимальное расстояние, на которое ракета может приблизиться к Солнцу, лишь на несколько миллионов километров меньше, чем среднее расстояние Земли от Солнца. Но орбита новой планеты не так симметрична относительно Солнца, как орбита Земли: приближаясь в перигелии (ближайшей к Солнцу точке орбиты) на 146 млн. *км*, она в афелии (наиболее далекой от Солнца точке орбиты) удаляется на 197 млн. *км*. Интересно отметить, что этой точки она достигла только в начале сентября 1959 г.



Орбита первого искусственного спутника Солнца.

Маленькая искусственная планета подходит в четыре раза ближе к Марсу, чем Земля, — до Марса остается всего 15 млн. *км*. Всего? Посмотрите на рисунок: вы сразу увидите, что стóит еще немного вытянуть орбиту нашей новой планеты — и она дойдет до орбиты Марса... Это означает, что советские ученые и инженеры практически уже сейчас могут обеспечить такую скорость, которая необходима для полета ракеты к Марсу или Венере.

На рисунке видно, что орбиты обеих планет — Земли большой и «Земли» маленькой — пересекаются. Значит ли это, что они могут встретиться?

Новая планета обращается вокруг Солнца медленнее, чем Земля: ее год равен почти пятнадцати месяцам, а не двенадцати, как у Земли. Так как ракета и Земля движутся вокруг Солнца с разными скоростями, расстояние между ними будет изменяться, то увеличиваясь, то уменьшаясь. Сначала Земля догонит ракету, затем обгонит на четверть и на половину орбиты, а затем снова начнет ее догонять. В процессе обращения искусственной планеты и Земли вокруг Солнца они могут сблизиться на расстояние около миллиона километров, но встретиться и столкнуться не могут. Если бы на полет ракеты влияло только притяжение Солнца, то, облетев вокруг него по эллипсу, ракета вернулась бы в ту же точку, т. е. пересекла бы орбиту Земли, и встреча их была бы возможна. Но, так как ее уже отклонила Луна, а в дальнейшем ее движение, как говорят астрономы, будет подвергаться возмущениям под влиянием притяжения других планет, она уже не сможет вернуться к месту старта.

КОНСТРУКЦИЯ ИСКУССТВЕННОГО СПУТНИКА СОЛНЦА

Советская космическая ракета была оснащена разнообразной научной и измерительной аппаратурой. Кроме того, она имела на борту четыре мощных радиопередатчика. Все эти приборы и батареи электропитания размещены в контейнере шаровой формы, установленном в носовой части последней ступени ракеты. Кон-

тейнер — оболочка спутника Солнца — изготовлена из алюминиево-магниевых сплавов. Эти сплавы легче алюминия и не уступают в прочности стали.

Так же как и аппаратура спутников, носовой отсек ракеты с расположенным в нем контейнером был прикрыт специальным конусом, который защищал контейнер от нагрева при движении ракеты в нижних слоях атмосферы. При достижении сильно разреженных слоев воздуха пружинный механизм сбросил конус; раскрылись, разойдясь в стороны, усы-антенны, прижатые до этого к длинной алюминиевой трубке, несущей на своем конце измеритель магнитного поля.

Но вот кончился участок разгона ракеты; автоматика прекратила управление, выключила двигатель последней ступени и подала команду на отделение контейнера от ракеты. Специальный механизм вытолкнул контейнер вперед. Так как толчок был не очень сильным, контейнер отдалился на сравнительно небольшое расстояние от ракеты и, находясь немного впереди нее, помчался по намеченной орбите.

Шар-контейнер с физическими приборами, радиоаппаратурой и вымпелами, несущими герб Советского Союза, и есть, собственно, первый искусственный спутник Солнца. Он очень похож на первый советский искусственный спутник Земли, который тоже был отделен от ракеты-носителя.

Для чего же понадобилось отделять контейнер от ракеты?

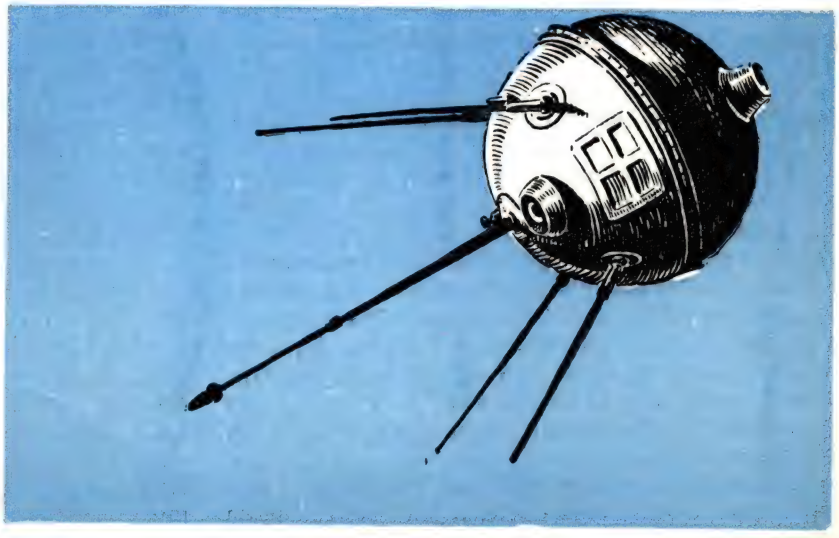
Это делается для того, чтобы не мешать работе антенн и исключить магнитные влияния металлических конструкций ракеты на показания магнитометра — чувствительного прибора, предназначенного для измерения магнитного поля Луны.

Корпус последней ступени ракеты мог бы оказаться помехой работе антенн, так как для ультракоротких волн (1,6 *м*) он явился бы своего рода экраном и создавал бы своеобразную радиотень. Попутно заметим, что для волн коротковолнового диапазона такое явление (экранирование) практически не наблюдалось бы, так как эти волны достаточно длинны: они беспрепятственно «обогнули» бы корпус ракеты.

Но контейнер — не только броня, защищающая от микрометеоритов. Его оболочка предохраняет приборы от сильных колебаний температуры. Если не принять специальных мер, температура освещенной Солнцем и теневой сторон ракеты может резко различаться. Поэтому необходимо принять меры для поддержания нормальной температуры, без чего невозможно обеспечить длительную и безотказную работу точных физических приборов, размещенных в контейнере. Если не отделить контейнер от ракеты, то пришлось бы регулировать и температуру корпуса всей ракеты.

Система терморегулирования, созданная в приборном отсеке советской космической ракеты, устроена следующим образом. Герметический шар-контейнер наполнен газом (азотом) под давлением 1,3 *атм*. Газ непрерывно перемешивается вентилятором и циркулирует между оболочкой и деталями приборов спутника, нагреваясь у более теплых и отдавая тепло более холодным частям конструкции. Кроме того, поверхность контейнера обработана таким образом, что излучение ею тепла в пространство и степень поглощения солнечных лучей позволяют поддерживать внутри «комнатную» температуру: 20°С.

Итак, вокруг Солнца фактически движутся две искусственные планеты: шар-контейнер и космическая ракета-носитель, но из-за незначительной разницы в массах их орбиты будут очень мало отличаться одна от другой.



Первая искусственная планета.

КАКИМИ ПРИБОРАМИ БЫЛА ОСНАЩЕНА КОСМИЧЕСКАЯ РАКЕТА

Кроме приборов и электропитания, в контейнере размещены два радиопередатчика: один — работавший на волне длиной около 15 *м* и служивший в основном для передачи на Землю данных научных измерений и другой — на волне длиной около 1,6 *м* — служивший совместно с приемными устройствами для радиоконтроля траектории движения ракеты. Здесь же были расположены приборы для изучения состава межпланетного газа. Рядом на приборной раме была установлена аппаратура для измерения магнитного поля Земли; «чувствующий» элемент этой аппаратуры расположен в конце длинной алюминиевой трубки, укрепленной на оболочке контейнера между антеннами.

Кроме измерительных приборов, в контейнере расположен так называемый телеметрический блок, предназначенный для кодировки и передачи по радио на Землю результатов научных измерений, а также данных о давлении и температуре внутри и снаружи контейнера. О том, как это делается, мы подробно рассказали в той части статьи, где шла речь об оснащении искусственных спутников Земли.

Но полезный груз размещен не только в контейнере. Кроме устройств, обеспечивающих автоматическое управление последней ступенью ракеты, в ее корпусе расположена часть источников электропитания, два радиопередатчика, работавшие на волнах, незначительно отличавшихся друг от друга (длиной около 15 *м*), счетчики космических лучей и аппаратура для образования искусственной кометы.

ИЗУЧЕНИЕ МЕЖПЛАНЕТНОГО ГАЗА

Благодаря космической ракете впервые появилась возможность изучить состав космической материи и межпланетного газа. Кроме молекул газа, в межпланетной среде содержится огромное количество частиц, излучаемых Солнцем. Этокак бы солнечный газ, плотность которого должна убывать по мере удаления от Солнца. Предполагается, что в одном кубическом сантиметре такого газа содержится до 1000 частиц — по космическим масштабам плотность этого газа весьма велика.

Изучить межпланетный газ можно только с помощью космической ракеты. Для этой цели на советской космической ракете были установлены так называемые протонные ловушки. Каждая такая ловушка состоит из трех полусферических электродов. Два внешних электрода сделаны из металлической сетки: внутренний, сплошной, служит коллектором, собирателем протонов. На электроды поданы такие электрические напряжения, что электрические поля, образующиеся между сетками ловушки, обеспечивают полное собирание всех протонов. На поверхности контейнера установлены четыре ловушки. Две из них собирают все протоны, имеющиеся в межпланетном газе, а две другие улавливают только протоны больших энергий, летящие от Солнца в составе корпускулярных потоков.

Чем больше протонов попадет в ловушку, тем больший ток потечет через ее коллектор. Токи всех ловушек усиливаются, и величины их с помощью радиотелеметрической системы (о которой мы подробно рассказали в главе, посвященной искусственным спутникам Земли) передаются на Землю.

КОСМИЧЕСКИЕ ЛУЧИ

На советской космической ракете была установлена многочисленная и разнообразная аппаратура для изучения космических лучей. Космические частицы различных энергий регистрировались счетчиками заряженных частиц и так называемыми люминесцентными счетчиками. (Об устройстве приборов, предназначенных для исследования космических лучей, было рассказано выше.) Измерения, проведенные на ракете, позволили представить картину распределения космических излучений на расстояниях, превышающих 100 тыс. *км* от центра Земли.

Оказалось, что вблизи Земли на расстоянии нескольких ее радиусов интенсивность, а значит, опасность и вредность излучения в сотни раз больше, чем в межпланетном пространстве.

И только начиная с расстояния, большего девяти радиусов Земли, интенсивность космических лучей уже не изменяется.

Аппаратура, установленная на ракете, позволила провести и качественный анализ космических лучей — определить энергию частиц. Было установлено, что энергия частиц, находящихся вблизи Земли, сравнительно невелика. Интенсивность же частиц на бо́льших расстояниях, как мы уже говорили, чрезвычайно мала — через один квадратный сантиметр пролетает всего две частицы в секунду. Таким обра-

зом, сведения, добытые советской космической ракетой, показывают, что людям нет оснований бояться лучевой болезни при полетах к другим планетам; правда, это справедливо для тех периодов, когда Солнце «спокойно» и не испускает потоков смертоносных излучений, которые в отдельных областях пространства могут иметь значительную интенсивность и быть опасными для живых существ.

Ученые установили также, что вблизи Земли есть две зоны — внутренняя, в которой господствуют частицы больших энергий, и внешняя, заполненная в основном электронами малых энергий. Советские ученые С. Н. Вернов и А. И. Лебединский на ассамблее Международного геофизического года выдвинули гипотезу, объясняющую образование такого облака космических частиц вблизи Земли. Согласно их предположению, в результате взаимодействия первичных космических лучей с атмосферой Земли образуется вторичное космическое излучение, частицы которого захватываются и удерживаются магнитным полем Земли.

Ученые считают, что аналогичные процессы происходят и вокруг других небесных тел, обладающих магнитными полями.

МАГНИТНЫЕ ИЗМЕРЕНИЯ

Одним из наиболее важных видов исследований, проведенных на нашей космической ракете, были магнитные измерения. Данные о напряженности магнитного поля, полученные специальным магнитометром, передавались по радио на Землю.

На основании этих данных могли быть выяснены законы изменения магнитного поля Земли, а также могло бы быть отмечено и магнитное поле Луны.

Третий советский искусственный спутник позволил измерить магнитное поле Земли в диапазоне высот от 230 до 1880 *км*, а магнитометр советской космической ракеты производил такие измерения на протяжении сотен тысяч километров.

Измерения с помощью спутников и ракет позволили установить, что магнитное поле Земли имеет такое же распределение, как поле однородно намагниченного шара. В основном оно однородно, но около Земли зарождаются и вновь исчезают области, в которых наблюдаются небольшие отклонения от закономерного распределения магнитного поля. Эти места получили название особых точек. Ученые предполагают, что спутники и ракеты встречают в особых точках облака космических частиц, обладающие собственным магнитным полем, которое и регистрируется магнитометром.

Магнитные поля планет и звезд, а также межзвездной космической материи имеют большое влияние на течение ряда процессов в околопланетных и межзвездном пространствах; поэтому исследования магнитных полей в Космосе имеют очень большое теоретическое и практическое значение.

МЕТЕОРИТЫ

Встреча с метеоритом грозит катастрофой будущим космическим кораблям и населенным искусственным спутникам Земли. Будущим астронавтам необходимо знать общее количество метеоритов в околоземном пространстве, пути их движения, вероятность столкновения с ними. В межпланетном пространстве, кроме сравнительно небольшого количества опасных метеоритов с массой более 1 *г*, существует огромное количество метеорного вещества, состоящего из твердых частиц, движущихся со скоростями от 10—15 до 100 и более километров в секунду.

Изучение метеорного вещества уже сейчас имеет огромное значение, так как важно не только оценить метеорную опасность для будущих межпланетных кораблей, но и уметь защитить физические приборы современных спутников и ракет.

Установленные на третьем советском спутнике солнечные батареи, «впитывая» солнечные лучи, принимают на себя удары бесчисленных микрометеоритов.

Непрерывная бомбардировка царапает, делает матовой поверхность солнечной батареи. Это препятствует проникновению солнечных лучей и, в конце концов, может полностью вывести батареи из строя.

Та же опасность подстерегает оптические устройства, которые установлены и будут устанавливаться на космических объектах. Объективы телескопов, кинокамер и телевизионных передатчиков будут царапаться метеоритами, терять прозрачность или даже разрушаться.

Для исследования метеорного вещества на приборном контейнере космической ракеты установлены два пьезоэлектрических датчика из кристаллов фосфата аммония.

В этих приборах используется так называемый пьезоэффект, о котором подробно шла речь

выше. Механическая энергия ударяющейся частицы превращается в электрическую энергию, величина которой зависит от массы и скорости частицы. При попадании метеорной частицы в поверхность пьезодатчика на нем появляется импульс, который подается на усилитель. После усилителя импульсы по величине разделяются на три «сорта». О числе импульсов каждого «сорта» радиотелеметрическая система немедленно сообщает на Землю.

Таким образом, измеряется не только общее количество частиц, столкнувшихся с данным датчиком, но определяется их весовой состав.

Научная аппаратура, установленная на борту советской космической ракеты, функционировала нормально на всем пути от Земли до Луны.

Данные научных наблюдений передавались по радио непрерывно в течение 62 час. Даже предварительный анализ измерений показал, что результаты этих исследований имеют огромное научное значение.

КАК НАБЛЮДАЛИ ЗА ПОЛЕТОМ РАКЕТЫ И ПОДДЕРЖИВАЛИ С НЕЙ РАДИОСВЯЗЬ

С момента старта и вплоть до выхода ракеты на орбиту вокруг Солнца многочисленные оптические, радио- и радиолокационные установки наблюдали и контролировали ее полет и принимали с нее научную информацию. Для того чтобы «поймать» летящую со скоростью метеора ракету в объектив телескопа или точно направить на нее антенну радиолокационного телескопа, нужно знать, где и когда она будет пролетать.

Решение этой задачи было далеко не легким делом. Вдоль трассы полета ракеты на территории Советского Союза были установлены специальные радиолокационные станции. Они автоматически следили за летящей ракетой и непрерывно передавали ее координаты на измерительные и наблюдательные установки, с помощью которых производилось точное измерение скорости и местоположения ракеты на первом этапе ее полета.

Непрерывные измерения этих величин автоматически передавались по специальным линиям радиосвязи на тысячи километров и поступали в вычислительный центр. Здесь вся измерительная информация автоматически вводилась в электронные счетные машины, которые вычисляли орбиту будущей планеты с учетом совместного перемещения ракеты, Луны, Земли и Солнца.

Все данные измерительных станций «привязывались», как говорят астрономы, к астрономическому времени с точностью до нескольких тысячных долей секунды. Для этой цели была создана специальная система единого времени, сигналы которой передавались по радио одновременно с сигналами, несущими информацию; поэтому всегда было известно, когда произведено то или другое измерение.

Когда ракета удалилась на такое расстояние что радиолокаторы уже не смогли автоматически «сопровождать» ее, контроль орбиты производился с помощью радиотехнической системы, работавшей на волне 1,6 *м*.

Применение коротковолновой аппаратуры объясняется тем, что на этих волнах могут вести прием радиолокационные телескопы, с помощью которых можно точно определить направление, по которому пришел сигнал, а значит, и направление на ракету. Этого нельзя сделать, принимая сигналы других передатчиков ракеты, работавших на волнах длиной около 15 *м*.

По сигналу с Земли в строго определенное время на ракете включался передатчик; мощные радиолокационные телескопы принимали его излучение и определяли направление на ракету. Данные этих измерений также передавались по радиолиниям в вычислительный центр. Совместная обработка этих измерений и полученных ранее данных от радиолокационных систем позволяла уточнять будущую орбиту и непосредственно контролировать движение ракеты.

Мощные передатчики, большие размеры антенн и высокочувствительные приемники позволили следить за ракетой на расстоянии до полумиллиона километров.

Но этим не исчерпывается роль радио на искусственном спутнике Солнца. Кроме определения траектории полета, радиосредства обеспечивали работу системы телеметрии: радиоволны несли на себе уникальные данные о научных измерениях в Космосе. Два передатчика, расположенные в корпусе ракеты, передавали данные о космических лучах, а третий передатчик в контейнере обеспечивал передачу основной научной информации.

Для большего удобства оптических наблюдений и фотографирования ракеты была создана искусственная «комета»: ракета выпустила светящееся газовое облако.

Что такое кометы вообще? Ученые считают, что кометы представляют собой скопление холодных камней и пыли, которое разогревает-

ся при прохождении вблизи Солнца. При этом они выделяют газы, которые обладают способностью светиться в лучах Солнца.

Масса газов, вызывающих свечение кометы, чрезвычайно мала. Свечение массы газа в 1 *кг* можно заметить на расстоянии 100 тыс. *км*.

Для создания искусственной кометы, или, вернее, ее светящегося хвоста, самым подходящим веществом оказался натрий. Его газовое облако является источником ослепительно яркого света: при массе паров натрия в 1 *кг* мощность излучения облака составляет около 7 тыс. *квт*. Такой светильник можно наблюдать с Земли в безлунную ночь на расстоянии 100 тыс. *км*, и не только в телескопы, но и простым глазом. Правда, этот источник света недолговечен: через одну-две минуты облако в безвоздушном пространстве расширится, яркость его уменьшится и наблюдать его станет невозможно. Но этих двух минут для наблюдения искусственного космического тела было достаточно.

На расстоянии 113 тыс. *км* от Земли установленный на ракете специальный испаритель с помощью воспламененного термита за несколько десятков секунд испарил килограмм натрия; образовалось облако размером с добрую сотню километров. 3 января в 3 часа 56 мин. 20 сек. по московскому времени первая искусственная комета зажглась в созвездии Девы. Натриевое облако видели многие астрономы мира. В частности, оно было сфотографировано с помощью специально созданных оптических устройств на астрономической станции близ Кисловодска, расположенной на высоте 2130 *м* над уровнем моря. Этот уникальный фотоснимок позволил уточнить орбиту ракеты и подтвердил, что ее движение происходило согласно предварительным расчетам.

Сейчас еще рано подводить итоги научных наблюдений, осуществленных с помощью советской космической ракеты. Магнитная пленка, на которую записаны данные всех этих наблюдений, имеет многие десятки километров длины, и их расшифровка и изучение займет много времени. Но уже теперь ясно одно: созданная руками советских людей космическая ракета явилась первым механизмом, разорвавшим оковы земного тяготения и вырвавшимся в безграничные дали Вселенной.

3 марта 1959 г., после неоднократных неудачных попыток, вырвалась в Космос и американская космическая ракета, также запущенная в сторону Луны. Американская ракета прошла в десять раз дальше от Луны, чем

Вымпел, помещенный на первой космической ракете.

советская, и, преодолев земное тяготение, вышла на собственную околосолнечную орбиту. Теперь уже два космических тела, созданные руками человека, стали искусственными спутниками Солнца.

ЗЕМЛЯ — ЛУНА

12 сентября 1959 г. в нашей стране была запущена в сторону Луны вторая космическая ракета. По конструкции она была похожа на свою предшественницу, запущенную 2 января, и несла на борту такую же научную и радиотехническую аппаратуру. Кроме этого, в приборном контейнере ракеты находился вымпел с изображением герба Советского Союза, который должен был быть доставлен на Луну как памятник великому подвигу советского народа, проложившего человечеству путь в Космос.

В предыдущем разделе статьи мы рассказали о том, как велики трудности, встающие перед учеными при вычислении траектории ракеты даже на таком коротком (по космическим масштабам) участке, как трасса Земля — Луна. А ведь тогда ракета должна была попасть только в район Луны, а не в самую Луну!

Чтобы составить себе представление о степени точности, которую необходимо было выдержать при запуске этой ракеты, достаточно привести несколько цифр. Так, ошибка в скорости ракеты всего на 1 *м/сек*, т. е. на 0,01% от величины полной скорости, приводит к отклонению точки встречи с Луной на 250 *км*. Отклонение вектора скорости от расчетного направления на одну угловую минуту вызывает смещение

точки встречи на 200 *км*. Существенно влияет на положение точки встречи ракеты с поверхностью Луны также изменение координат места выключения двигателя. Столь же важно точно выдержать и заданное время старта: опоздание на 10 сек. приведет к отклонению точки встречи на 200 *км*.

То обстоятельство, что советская космическая ракета успешно достигла поверхности Луны, убедительно свидетельствует о том, что наша страна располагает не только самыми мощными в мире ракетами, но и самой совершенной системой автоматического управления и контроля.

Несмотря на то, что с момента запуска второй космической ракеты прошло еще совсем немного времени, уже можно подвести первые итоги проведенных с ее помощью научных исследований.

Наиболее важным из них является установление того факта, что Луна не создает вокруг себя магнитного поля. Это указывает на то, что она не обладает ядром, подобным ядру Земли. Также не обнаружен и пояс радиации вокруг Луны, что хорошо согласуется с результатами магнитных измерений. Кроме этого, на пути следования ракеты были произведены измерения общего потока космического излучения, получены новые данные о рентгеновских лучах, гамма-лучах, микрометеоритах, а также выполнен целый ряд других исследований.

Расчеты советских ученых и инженеров оказались совершенно точными: 14 сентября в 00 часов 02 минуты 24 секунды приборный контейнер второй советской космической ракеты коснулся поверхности Луны! Впервые за всю историю созданный руками человека механизм достиг другого небесного тела.

Не успела весть об этом историческом событии как следует войти в сознание людей, как наша наука опять поразила мир новым удивительным достижением: 4 октября 1959 года, в день второй годовщины запуска первого советского искусственного спутника Земли, в Советском Союзе была запущена третья космическая ракета. На этот раз она была направлена таким образом, что, обогнув Луну, она вернулась в район Земли. На борту ракеты находилась автоматическая межпланетная станция, отделившаяся от последней ступени ракеты в момент выключения двигателя.

Установленная на автоматической станции фототелевизионная аппаратура сфотографировала и передала на Землю фотографию невидимой нам стороны Луны.

ПРОБЛЕМЫ БУДУЩЕГО

Создание обитаемых спутников Земли потребует разрешить множество самых различных проблем. Ведь персонал межпланетной лаборатории должен будет долгое время жить, т. е. дышать, есть, двигаться, работать в непривычных, неестественных условиях. Наиболее неестественным с первого взгляда кажется необходимость существования при огромных скоростях.

Мы нормально чувствуем себя в быстро мчащемся пассажирском поезде и даже в самолете ТУ-104, который развивает скорость около 1000 *км/час*. Но означает ли это, что и на спутнике, имеющем скорость около 30 тыс. *км/час*, человек будет чувствовать себя так же? Оказывается, в этом отношении нет оснований для беспокойства: скорость не страшна человеческому организму.

Вспомним, что мы вращаемся вместе с Землей, а каждая точка на экваторе движется со скоростью 1700 *км/час* — намного быстрее, чем ТУ-104! Сама Земля со скоростью 108 тыс. *км/час* мчится по своей орбите вокруг Солнца, а вся солнечная система каждый час пролетает в мировом пространстве 900 тыс. *км*. А ведь мы ничего этого даже не замечаем!

Страшна не скорость, страшно ускорение. Именно оно вызывает такое увеличение нагрузок на человеческий организм, что его работа может быть катастрофически нарушена. Самое неприятное последствие даже сравнительно небольшого ускорения (в случае прямолинейного движения) — это отлив крови от тех частей организма, которые обращены в сторону движения ракеты. Оно может привести к длительному обмороку и даже гибели организма. Такие же последствия может иметь возникающее под действием ускорения смещение внутренних органов человека. Поэтому для ракеты с живыми пассажирами ускорение не должно быть очень большим.

Другими словами, разгонять ракету нужно плавно, а когда орбитальная скорость будет достигнута и двигатели прекратят работу, человек сразу же перестанет ощущать движение. К несчастью, он перестанет ощущать и свой вес. Ведь ничто не будет прижимать пассажиров к полу космического корабля. То, что мы называем весом, исчезнет совсем.

Как же человек будет переносить состояние невесомости?

На разных людей потеря веса действует поразному. Успешное пребывание в мире без тяжести сильно зависит от тренировки. Но, во

всяком случае, уже твердо установлено, что кратковременное состояние невесомости для большинства людей не вредно. Ученые ожидают, что отсутствие веса не вызовет существенных расстройств в организме, лишь бы не подвела нервная система.

Очень интересна проблема питания на космических кораблях. Казалось бы, что может быть проще, чем съесть обед, позавтракать, поужинать? Но в необычных условиях невесомости все меняется. Если легко откусить «космический» бутерброд, то не так просто попить чаю или молока. Жидкость, если ее вылить в открытый сосуд, тотчас же соберется в шар и будет висеть в воздухе или растечется по кабине, смачивая стены, пол и потолок.

Чтобы сварить обед, кастрюлю нужно будет плотно закрыть крышкой, а иначе содержимое кастрюли, свернувшись в шар, перекочует на стену или потолок. Очевидно, кастрюлю придется ставить в специальную центрифугу и быстро вращать, чтобы ее содержимое прижалось к стенкам.

Если астронавт, уставший от такого сложного обращения с жидкостями, захочет немного отдохнуть и выкурить папиросу, то и это ему не удастся. Спичка еще зажжется, но папироса гореть не будет. Дело в том, что горячие газообразные продукты сгорания здесь не будут легче окружающего воздуха и не поднимутся вверх. Скопляясь около папиросы, они станут мешать доступу кислорода, необходимого для поддержания горения, и папироса потухнет.

По той же причине вентиляторы должны будут непрерывно перемешивать воздух в кабине, так как выдыхаемая нами углекислота останется тут же у рта, и можно задохнуться, если сидеть или стоять на одном месте.

Как видим, жизнь в условиях невесомости не сулит больших удобств. Но всегда есть выход! Можно, например, создать на спутнике искусственную тяжесть. Способ простой. Наверное, каждый делал такой опыт — крутил открытое ведерко с водой, и вода при этом не выливалась. Дело в том, что возникающая при вращении центробежная сила прижимает воду ко дну ведерка. Подобно этому, обретает свой вес и любой предмет, находящийся на борту спутника, если последний будет вращаться вокруг своей оси. Заметим сразу, что этот искусственный вес будет зависеть от скорости вращения.

Наиболее вероятной конструкцией населенного спутника Земли считается большое полое кольцо, немного похожее на огромное автомобильное колесо. Конечно, такое колесо-лабораторию не доставишь в Космос на буксире. Оно будет доставлено «на небо» по частям и собрано «на месте». В нем разместятся многочисленные службы, лаборатории, жилища. То, что мы называем полом, будет находиться на внешней стороне кольца, а «потолок» — со стороны оси. Если размер колеса будет не очень велик, людям придется стоять под небольшим углом друг к другу, но зато все вещи станут весомыми, предметы опять будут падать на пол, а вода — выливаться из бутылок.

Вращать спутник-колесо нетрудно, достаточно будет только подтолкнуть его небольшой ракетой.

Но во «внеземной» жизни космонавтов будут подстерегать и серьезные опасности. При работе вне спутника можно легко от него оттолкнуться, но, чтобы подлететь к нему обратно, отталкиваться будет уже не от чего! Поэтому придется либо привязываться канатом, либо брать с собой реактивный пистолет. Если прижать такой пистолет к себе и выстрелить, то сила отдачи отбросит стрелка в противоположную сторону.

А что будет представлять собой космический скафандр? Конечно, у него будет мало общего со скафандрами для высотных полетов. Дело в том, что космический скафандр, кроме создания нормальной среды для дыхания, должен еще обеспечить в заатмосферном пространстве необходимую для человека температуру, а главное — защитить его от действия космических лучей, космической пыли и микрометеоритов. Скафандр из мягкой ткани надуется, как мяч, и в нем будет трудно двигаться. Поэтому космический скафандр будет, очевидно, больше напоминать металлические доспехи рыцарей. Для защиты от метеоритов придется, возможно, использовать многослойные покрытия.

Невероятно сложен полет в межпланетном пространстве. Даже сейчас, когда первые искусственные спутники Земли и Солнца, можно сказать, уже проложили туда путь, много труднейших проблем стоит перед работающими в этой области учеными и инженерами. Одна из основных проблем — это защита от вредоносных излучений Космоса. Атмосфера Земли надежной броней защищает нас от ультрафиолетовых и рентгеновских лучей Солнца и от большей части космических лучей. Но укрыться за атмосферой не сможет даже совсем низко летящий спутник.

Однако от ультрафиолетовых и даже рентгеновских лучей защититься сравнительно про-

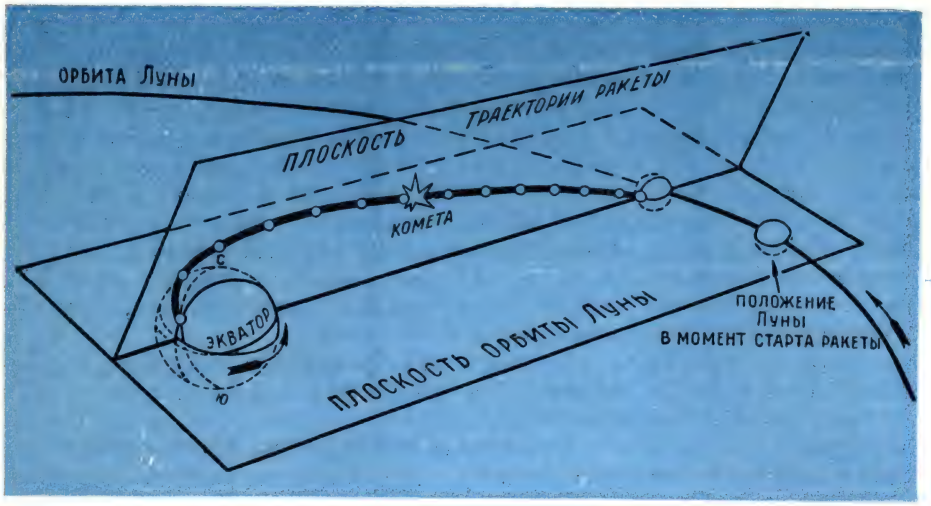


Схема траектории полета второй советской космической ракеты.

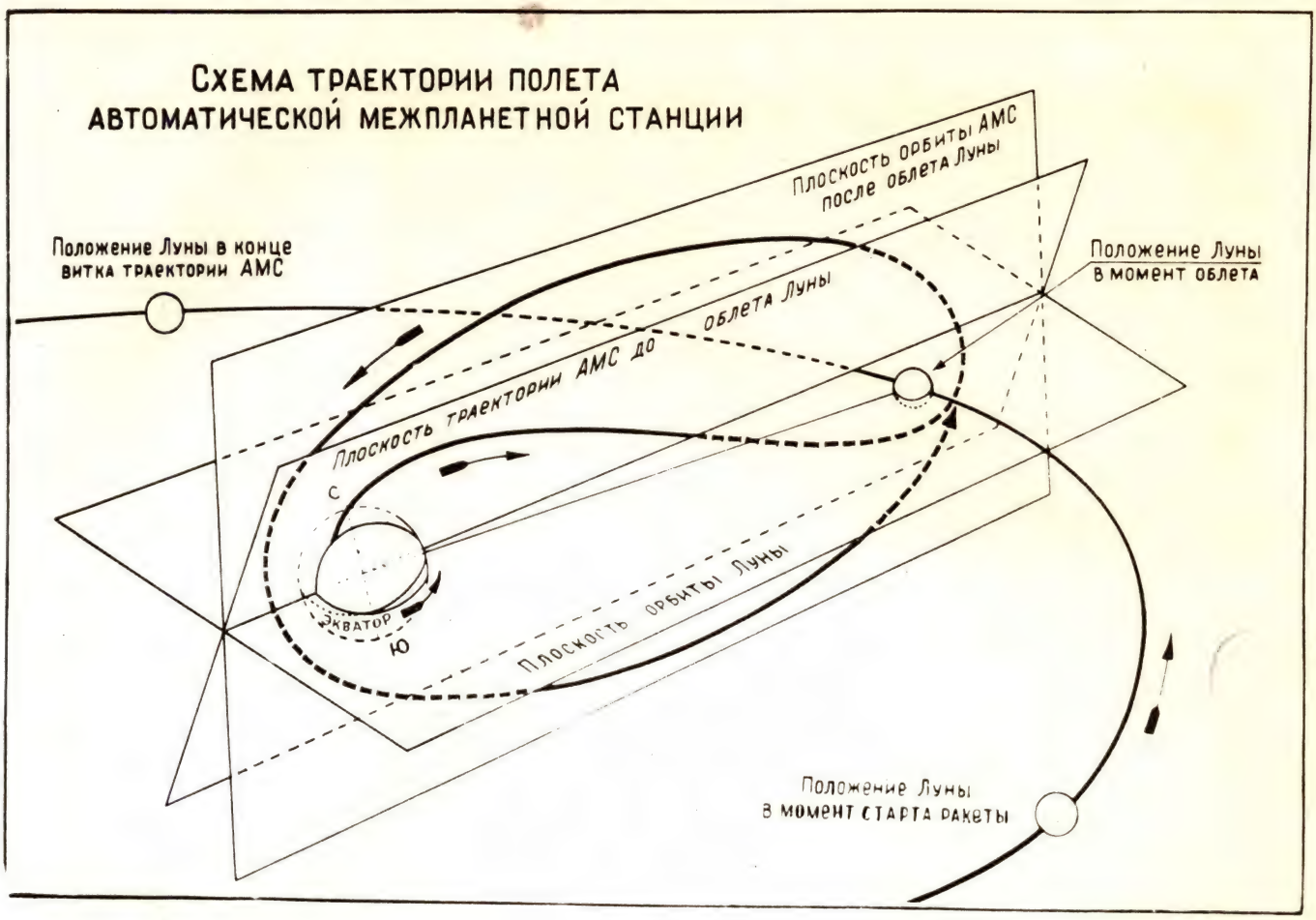
сто. Их задерживает даже тонкая металлическая стенка космического корабля. А вот от космических лучей надежной защиты пока нет.

Можно было бы покрыть спутник свинцовой оболочкой. Слой свинца в 2—3 *см* задержит до 35% космических лучей. Но создание брони из такого тяжелого металла потребует огромного дополнительного расхода топлива при запуске спутника с Земли. Поэтому ученые усиленно ведут поиски в других направлениях.

И еще одна серьезная неприятность, ожидающая будущих космических путешественников,— метеориты. Радикальных способов защиты от них пока также нет. Правда, вероятность попадания метеорита в космический корабль ничтожна. Это нагляднее всего подтвердила жизнь двух первых советских спутников. Они несколько раз проходили через метеорные потоки, но существенных повреждений не получили. Между тем столкновение даже с небольшим метеоритом (имеющим диаметр 2—3 *мм* и весящим доли грамма) вызовет разрушение герметической оболочки спутника и, возможно, гибель его экипажа. Ведь удар самого крошечного метеорита (имеющего огромную скорость— несколько десятков километров в секунду) вызывает взрыв, подобный взрыву артиллерийского снаряда. В результате оболочка не только разрушится, но и внутри спутника возникнет мощная ударная волна, которая буквально расплющит все на своем пути.

Это, несомненно, грозная опасность, но и здесь люди сумели найти довольно простой выход. Дело в том, что метеорит в момент удара мгновенно испаряется и разрушения производит уже не он сам, а возникающая в результате его удара динамическая ударная волна. Произведенные опыты показали, что даже железный метеорит в большинстве случаев не может пробить слой металла, более толстый, чем его диаметр. Поэтому если на расстоянии 20—30 *см* от герметической оболочки спутника сделать еще одну (уже не герметическую) оболочку, например из алюминиевых листов 2—3 *мм* толщиной, то абсолютное большинство метеоритов, имеющих диаметр меньше 2—3 *мм*, «погибнет» в этой наружной оболочке. Даже если какой-нибудь метеорит и пробьет ее насквозь, то и это не приведет к катастрофическим последствиям — ведь между внутренней и наружной оболочками спутника нет воздуха, и, значит, ударной волне просто не в чем образоваться. Если к тому же учесть, что из общего числа метеоритов, достигающих поверхности Земли, на долю железных приходится всего 25%, а большинство метеорных частиц представляет собой, по-видимому, крошечные сгустки замерзших газов, имеющих ничтожную пробивную способность, то станет ясно, что и метеоритную опасность также можно победить. Но, конечно, будущие космические корабли должны обладать способностью лавировать — избегать больших метеоритов.

Сложнейшую научно-техническую проблему представляет управление полетом ракет. Их полет будет проходить в накладывающихся друг на друга полях тяготения различных планет. Оторвавшись от Земли, ракета попадает в поле тяготения Солнца и Луны. В более далеких областях на нее начнет действовать притяжение Марса и Юпитера. Командир и штурман космического корабля должны уметь учитывать поля тяготения всех планет, вблизи которых будет проходить трасса космического перелета, и уметь ими пользоваться. Маневрируя в полях тяготения, можно даже увеличивать скорость ракеты. При этом нужно иметь в виду, что управление космическим кораблем совсем не будет



В соответствии с намеченной программой научных исследований 7 октября в 6 часов 30 минут московского времени на борту автоматической межпланетной станции было произведено включение аппаратуры, предназначенной для получения изображения невидимой с Земли части Луны и последующей передачи этого изображения на Землю.

Для фотографирования Луны автоматическая межпланетная станция снабжена системой ориентации и фототелевизионной аппаратурой со специальными устройствами для автоматической обработки фотопленки.

Время процесса фотографирования было выбрано так, чтобы станция на своей орбите находилась между Луной и Солнцем, которое освещало около 70 процентов невидимой стороны Луны. При этом станция находилась на расстоянии 60—70 тыс. км. от поверхности Луны.

Включенная специальной командой система ориентации повернула станцию таким образом, чтобы объективы фотоаппарата были направлены на обратную сторону Луны, и дала команду на включение фотоаппаратуры.

Фотографирование Луны продолжалось около 40 минут, и при этом было получено значительное количество снимков Луны в двух различных масштабах.

Обработка фотопленок (проявление и фиксирование) была автоматически произведена на борту межпланетной станции.

Передача сигналов фотоизображений Луны на Землю производилась при помощи специальной радиотехнической системы. Эта система одновременно обеспечила передачу данных научных измерений, определение элементов орбиты, а также передачу с Земли на межпланетную станцию команд, управляющих ее работой. Телевизионная аппаратура обеспечила передачу полутонового изображения с высокой разрешающей способностью.

На борту автоматической межпланетной станции была также размещена аппаратура, предназначенная для проведения научных исследований в межпланетном пространстве. Полученные результаты научных исследований записаны на пленку наземными станциями.

Работа автоматической межпланетной станции на первом обороте показала, что:

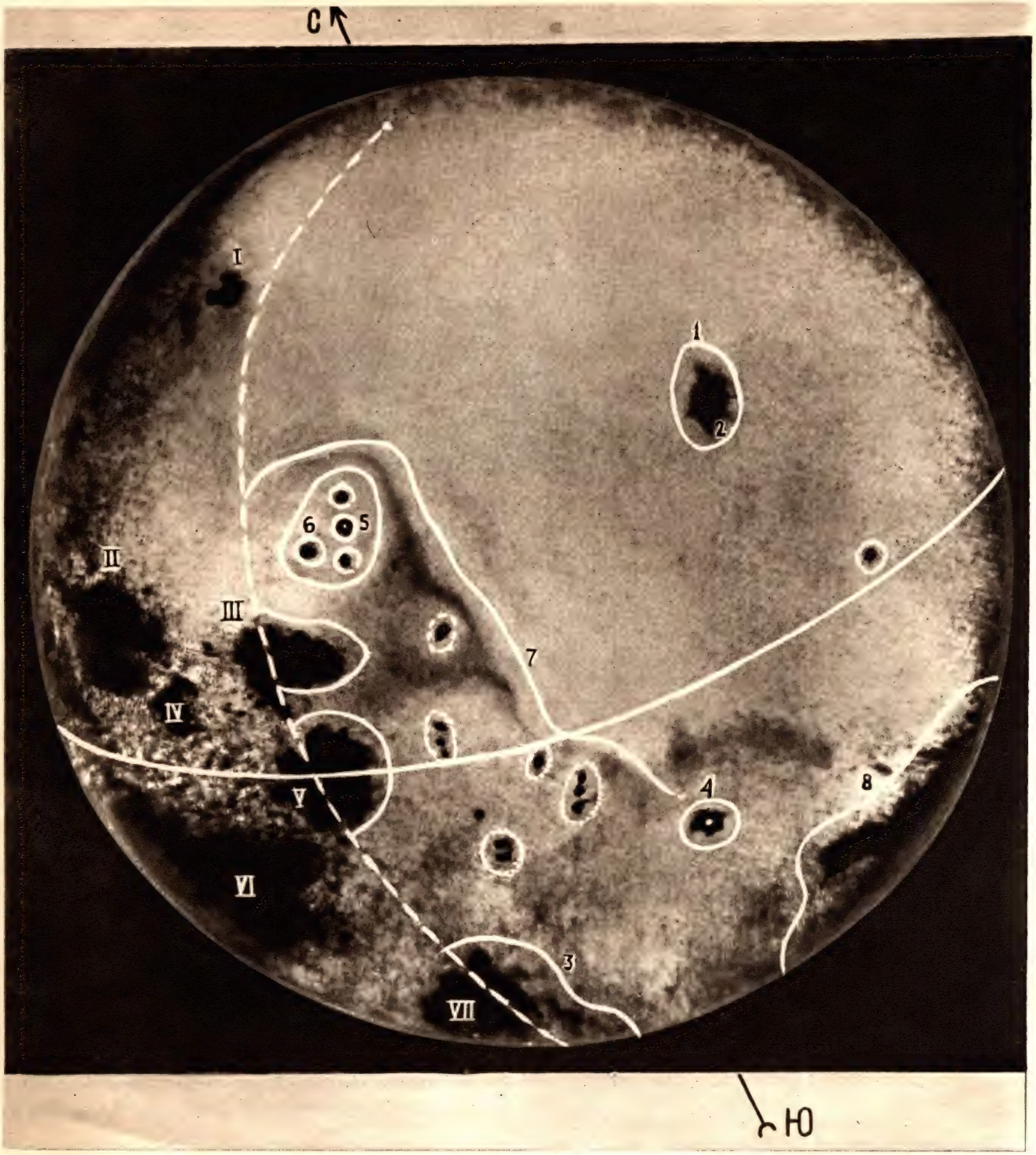
успешно обеспечен полет космического объекта по сложной, заранее рассчитанной орбите;

решена задача ориентации объекта в пространстве;

осуществлена радиотелемеханическая связь и передача телевизионных изображений на космических расстояниях;

получено изображение недоступной до сих пор исследованиям обратной стороны Луны и ряд других научных результатов.

Из сообщения ТАСС от 27 октября 1959 г



Распределение объектов на невидимой с Земли стороне Луны, выявленных при предварительной обработке фотографий, полученных с борта автоматической межпланетной станции: 1. Большое кратерное море диаметром 300 км — море Москвы; 2. Залив Астронавтов в море Москвы; 3. Продолжение Южного моря на обратной стороне Луны; 4. Кратер с центральной горкой — Циолковский; 5. Кратер с центральной горкой — Ломоносов; 6. Кратер — Жолио-Кюри; 7. Горный хребет — Советский; 8. Море Мечты. Сплошная линия, пересекающая схему,— лунный экватор; пунктирная линия — граница видимой и невидимой с Земли частей Луны. Сплошной линией обведены объекты, достоверно установленные при предварительной обработке; пунктирной линией обведены объекты, требующие уточнения формы; точками окружены объекты, классификация которых уточняется; в остальной части — производится дальнейшая обработка полученных фотоматериалов. Римскими цифрами обозначены объекты видимой части Луны: I — море Гумбольдта; II — море Кризисов; III — море Краевое, имеющее продолжение на невидимой части Луны; IV — море Волн; V — море Смита, имеющее продолжение на невидимой части Луны; VI — море Плодородия; VII — море Южное, имеющее продолжение на невидимой части Луны.

похоже на управление морским судном на Земле. Капитан корабля не будет стоять у штурвала или подавать команды «право руля» или «лево руля». Так как весь путь между орбитами планет космический корабль будет лететь по инерции, то проверка правильности маршрута будет, очевидно, возложена на специальное «думающее» электронно-решающее устройство. Непрерывно вычисляя координаты корабля и сверяя их с заданным графиком полета, такая машина быстро обнаружит отклонение от курса, вычислит величину и направление «толчка», который вернет ракету на правильный курс, и передаст соответствующую команду на двигатели. Все это будет делаться автоматически. Вмешательство человека потребуется лишь в том случае, если выяснится неточность составленного на Земле графика полета и его придется переделывать уже на трассе.

Конструкция ракеты — покорителя межпланетного пространства — должна быть весьма совершенной. Но следует вспомнить, что уже сегодня советская космическая ракета, стартуя даже с низколетящего спутника, могла бы совсем покинуть солнечную систему.

В этом заключено одно из основных преимуществ искусственных спутников, на которое указывал еще Циолковский. Скорость, с которой запущен искусственный спутник, не пропадает даром. Если для отлета на Венеру с Земли необходима скорость 11,5 *км/сек*, то 8 *км/сек* мы уже «истратили» при запуске спутника. Значит, при старте с него нам потребуется всего лишь 11,5 *км/сек* — 8 *км/сек*=3,5 *км/сек*.

Поэтому большие обитаемые спутники станут выгодными стартовыми площадками, на которых можно будет постепенно заготовить горючее, собрать ракету, рассчитанную на сравнительно небольшую скорость, и стартовать к ближайшим планетам.

Межпланетные станции могут быть оборудованы также на спутниках других планет, например на Фобосе или Деймосе — спутниках Марса.

Перечислив наиболее грандиозные и сложные проблемы искусственных спутников, мы не сказали о самой насущной и первоочередной задаче — об обратном спуске на Землю, о безопасном возвращении людей и оборудования из космического пространства.

Уже не раз пушистые лающие пассажиры спускались с советских ракет с высоты 200 *км*. Во время этих опытов выяснилось, что парашют уверенно раскрывается на 85-м *км* и купол его хорошо наполняется, хотя воздуха там почти нет — плотность его в 180 тыс. раз меньше, чем у поверхности Земли. Но раскрыть парашют ниже 45 *км* нельзя. Оказывается, плотность воздуха на этих высотах настолько ощутима, а скорость падения так велика, что парашют не выдерживает нагрузки и буквально разлетается на куски. Но если долететь до 4 *км*, то парашют можно открывать спокойно. К этому времени плотный воздух настолько снизит скорость свободного падения, что парашют легко выдержит возникшую нагрузку. Для ее смягчения применяются многоступенчатые сверхвысотные парашюты. Их, разумеется, изготавливают из специальных материалов. Достаточно сказать, что даже при скорости 900 *м/сек* они не сгорают от трения о воздух. Но все-таки и на таком парашюте пока невозможно спуститься со спутника.

Скорее всего, единственным обратным транспортом еще долго будет космический планер. Небольшой пороховой ракетой его нужно столкнуть со спутника в сторону, противоположную движению спутника. Скорость планера станет меньше круговой, и он по спирали начнет приближаться к Земле. Крылья позволят ему планировать, поэтому спуск будет продолжаться несколько часов и планер не перегреется. Но все это относится к спуску со спутников, летящих близко к Земле, когда близко находится атмосфера, хотя и не очень плотная, и когда планер тотчас же после сброса начинает тормозиться.

А для спуска с будущих высокорасположенных спутников планеру придется тормозиться в несколько этапов. Пройдя некоторый участок пути в атмосфере, он по эллипсу выйдет в межпланетное пространство «прохладиться». Затем снова войдет, но уже в более плотные слои атмосферы и снова выйдет, чтобы остыть... Так постепенно его скорость снизится, и он сумеет приземлиться.

Впрочем, едва ли космический планер будет садиться сам. Скорее всего, его перехватит скоростной самолет-матка и на своей «спине» посадит на Землю: ведь перехват в воздухе планеров — уже давно освоенная операция.

Но создание обитаемых искусственных спутников Земли — не единственная задача, стоящая перед исследователями Космоса. Успешные полеты к Луне советских космических ракет убедительно говорят о том, что путешествия человека к другим планетам возможны и до создания обитаемых спутников.

Если с помощью современной ракеты до Юпитера можно будет долететь за несколько лет, то до Плутона придется лететь полвека —

50 лет! А ближайшая звезда — α Центавра находится от нас на расстоянии 40 биллионов *км*. Долгие 4 года идет свет от этой звезды до нашего глаза, а звук дошел бы только через 4 млн. лет!

Может быть, звезда, светом которой мы любуемся, уже давно погасла или взорвалась, а мы все еще ее видим! Скорость света составляет 300 тыс. *км/сек*. Сколько же километров он пройдет за год! Эта цифра с огромным количеством нулей красноречиво говорит о том, что человеческой жизни не хватит, чтобы вырваться к звездам, даже когда человек достигнет на своих летательных аппаратах колоссальных скоростей в 50, 150, 500 *км/сек*!

Но для таких скоростей нужны и совершенно новые виды топлива. Предполагалось, например, в камеру сгорания поместить нечто вроде медленно взрывающейся атомной бомбы. Скорость истечения продуктов радиоактивного распада урана-235 превышает 10 тыс. *км/сек*. Но нет таких жароупорных сплавов, которые могли бы выдержать температуру ядерной реакции. Кроме того, образующиеся продукты распада очень легки, их масса мала, а значит, будет мала и развиваемая таким двигателем реактивная тяга. Может быть, удастся добавить в струю атомных осколков какой-нибудь наполнитель, который, кстати, немного охладит сопло. Возможно! Пока это нерешенная техническая проблема.

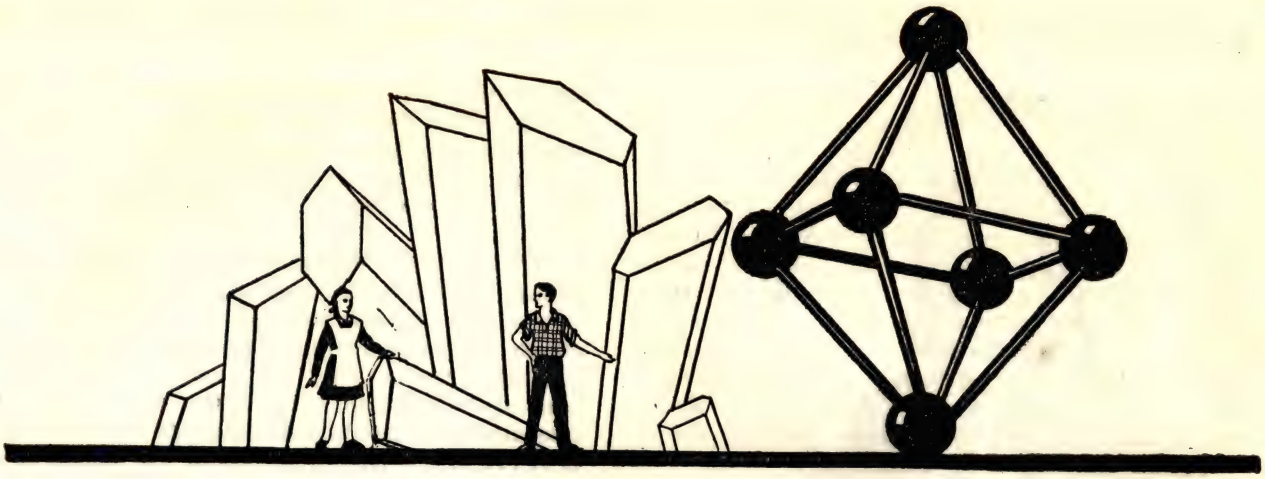
Но, даже решив ее, человек еще не добьется нужных скоростей. Как известно, максимально возможная скорость—это скорость света. К ней, очевидно, и нужно стремиться. Тогда скорость истечения газов должна почти равняться скорости света. Точнее говоря, истекать должен сам свет!

Известно, что световые лучи производят давление. Показал это знаменитый русский физик П. Н. Лебедев. По взглядам современной физики, свет имеет прерывистое строение и состоит из фотонов, обладающих определенной массой. А раз так, значит, свет может оказывать давление. Подсчитано, например, что лучи Солнца давят на земной шар с силой 400 тыс. *Т*. Вот если бы хоть часть этой силы «запрячь» в ракету!..

Над проблемами создания фотонной ракеты уже работают некоторые ученые. Идея ее ясна, но до технического осуществления еще далеко. Пытаясь предвосхитить ее конструкцию, многие ученые, например, утверждают, что если мощная термоядерная горелка направит поток лучистой энергии на огромный отражатель, который отбросит его назад, то сам отражатель вместе с остальными конструкциями ракеты устремится вперед со скоростью, близкой к скорости света. Такая ракета дойдет до Марса за 1 час. Станет реальной и возможность посещения далеких звезд. По подсчетам других специалистов получается, однако, что термоядерная горелка — это постепенно взрывающаяся водородная бомба—не годится как источник энергии для межзвездного корабля. Для этого даже она слишком слаба! Только вся заключенная в веществе энергия, полностью превращенная в излучение, способна донести космический корабль до других звездных миров.

Но даже если бы удалось все вещество целиком излучить в виде световой энергии, то и тогда трудно представить себе, как направить эту феноменальную энергию в одном направлении, так как любое зеркало-отражатель моментально испарится при соприкосновении с таким мощным световым потоком.

Как ни заманчива идея подобного корабля, как ни приятна надежда хоть когда-нибудь посетить другие звездные миры, нужно признать, что в настоящее время человечество не располагает никакими техническими средствами даже для того, чтобы только поставить такую грандиозную проблему. Но техническая мечта — не сказка, она рождается на основе предшествующих достижений. Поэтому, каким бы смелым ни было дерзание научной мысли, когда-нибудь оно осуществится, как сбылись предсказания фантастов прошлого о подводных кораблях, летательных аппаратах, стимуляторах роста, синтетических органических веществах, как на наших глазах сбывается мечта о завоевании космического пространства. На спутниках с искусственной тяжестью, на ближайших, затем и на дальних планетах люди создадут лаборатории, крупные научные центры, астрогорода. Сбудется и мечта сегодняшнего дня о далеких межзвездных полетах. Советские люди создали первое искусственное космическое тело, открыв эру межпланетных полетов. Им же суждено проложить дорогу к звездам.



Строение вещества и работа тепловых машин

МОЛЕКУЛЯРНОЕ СТРОЕНИЕ ВЕЩЕСТВА

Из чего построен окружающий нас мир? Впервые попытались дать ответ на этот вопрос древние греки более 25 веков тому назад.

Ответы их кажутся на первый взгляд очень странными, и мы должны были бы потратить много бумаги, чтобы объяснить читателю логику древних мудрецов: Фалеса, утверждавшего, что все состоит из воды, Анаксимена, говорившего, что мир построен из воздуха, или Гераклита, считавшего, что все состоит из огня.

Неубедительность подобных объяснений заставила более поздних греческих «любителей мудрости» (так переводится слово «философ») увеличить число первооснов, или, как их называли в те времена, элементов. Эмпедокл утверждал, что элементов четыре: земля, вода, воздух и огонь. В это учение внес поправки Аристотель.

Согласно Аристотелю, все тела состоят из одного и того же вещества, но это вещество может обладать различными элементами-свойствами. Этих невещественных свойств четыре: холод, тепло, влажность и сухость.

Соединяясь по два и будучи приданы единому веществу, элементы-свойства Аристотеля образуют элементы Эмпедокла. Так, сочетание сухого и холодного вещества дает землю, сухого и горячего — огонь, влажного и холодного — воду и, наконец, влажного и горячего — воздух.

Ввиду трудности ответа на ряд вопросов, философы древности добавили к четырем элементам-свойствам еще «божественную

квинтэссенцию» —что-то вроде бога-повара, сваривающего воедино разнородные элементы-свойства. Ссылкой на бога, разумеется, нетрудно дать объяснение любой неразрешимой загадке, любому недоумению.

Впрочем, очень долгое время, почти вплоть до XVIII в., мало кто отваживался недоумевать и задавать вопросы. Учение Аристотеля было признано церковью. Сомнение в его справедливости каралось как ересь.

И все же сомнения эти возникали. Породила их алхимия.

Уже в далекие времена человек знал, что большинство окружающих нас тел способно превращаться в другие. Такие явления, как сплавление металлов, горение, обжиг руды, были хорошо известны людям.

Это, казалось бы, не противоречило учению Аристотеля. При любом превращении менялась, так сказать, «дозировка» элементов.

Если весь мир состоит всего из четырех элементов, то возможности превращения тел должны быть очень велики. Нужно найти лишь секрет, знать дозы, и тогда из любого тела можно получить любое другое.

До чего заманчивым казалось научиться делать золото из свинца или угля, найти необыкновенный «философский камень», дающий его обладателю богатство, власть, вечную молодость! Науку об изготовлении золота и философского камня, о превращении любого тела в любое другое средневековые арабы назвали алхимией.

Столетиями продолжалась работа людей, посвятивших себя этой науке. Алхимики не научились делать золото, не нашли философского камня, зато они накопили много ценных знаний о телах и их превращениях, и собранные ими сведения послужили в конце концов смертным приговором для самой алхимии. В XVII в. многим стало ясно, что число основных элементов несравненно больше четырех. Ртуть, свинец, сера, золото, сурьма оказались неразлагаемыми веществами. Утверждать, что они построены из элементов, было бы теперь очевидной нелепостью. Пришлось причислить их к основным элементам мира.

В 1668 г. в Англии вышла в свет книга Роберта Бойля «Скептический химик, или Сомнения и парадоксы относительно элементов алхимиков». Здесь мы находим совершенно новое определение элемента. Это уже не неуловимый, таинственный невещественный элемент алхимиков. Теперь элемент — это вещество, составная часть тела.

«Я называю элементами,— писал Бойль,— некоторые первоначальные и простые, вполне несмешанные тела; эти тела не состоят из других тел или друг из друга и являются составными частями, из которых сложены все смешанные тела...»

Это вполне современное определение понятия элемента.

Список элементов Бойля невелик; конечно, в нем были и ошибки: так, в качестве элемента в списке значился огонь. Впрочем, идеи об элементах-свойствах еще долго жили в науке. Даже в списке великого Лавуазье, одного из основоположников химии, наряду с действительно существующими элементами фигурируют и несуществующие: теплотвор и световое вещество.

В первой половине XVIII в. было известно 15 элементов. К концу века их число возросло до 35. Правда, лишь 23 из них были действительно элементами, остальные — это или несуществующие элементы, или такие вещества, как, например, едкий натр и едкий калий, которые тогда еще не умели разлагать на составные части.

К середине XIX в. в химических руководст-

вах описывалось уже свыше 50 неразложимых веществ.

Новое слово в науке об элементах сказал великий русский ученый Дмитрий Иванович Менделеев, открывший периодический закон, с помощью которого стало возможным искать еще не открытые элементы.

В начале XX в. были найдены почти все встречающиеся в природе элементы. Их оказалось 88. За 40-е и 50-е годы в лабораторных условиях было искусственно получено еще 15 элементов, не существующих в природе. Всего в настоящее время известен 101 элемент.

АТОМЫ И МОЛЕКУЛЫ

Около 2000 лет назад в Древнем Риме была написана оригинальная поэма «О природе вещей». Ее автором был римский поэт Лукреций Кар [1]. Звучными стихами рассказал Лукреций в своем поэтическом произведении о взглядах древнегреческого философа Демокрита на мир, об его учении о невидимых частичках, из которых построен весь наш мир.

Наблюдая различные явления, Демокрит пытался дать им объяснение. Вот, например, вода. При сильном нагревании она превращается в невидимый пар и улетучивается. Как это можно объяснить? Ясно, что такое свойство воды связано каким-то образом с ее внутренним строением.

Или почему, например, мы ощущаем запахи различных цветов на далеком расстоянии?

Размышляя над подобными вопросами, Демокрит пришел к убеждению, что тела только кажутся нам сплошными, на самом деле они состоят из мельчайших частиц. У различных тел эти частицы различны по своей форме, но они настолько малы, что увидеть их невозможно. Поэтому-то любое тело и кажется нам сплошным.

Предположение, что все тела в мире: и земля, и животные, и растения, и воздух, и сам человек — построены из невидимых частиц, очень просто объясняло ранее непонятные явления природы.

В самом деле, если вода не является сплошным телом, а состоит из «водяных» частиц, то не представляет особого труда объяснить ее превращение в пар.

Когда кипящая вода превращается в пар, то это означает, что частицы воды отрываются от ее поверхности и улетают в воздух, уже не соединяясь друг с другом, как это было в воде.

Так же легко можно объяснить и то, почему мы ощущаем запахи различных цветов. От душистых веществ, находящихся в цветах, отрываются и разлетаются в воздухе отдельные невидимые частички. Эти частички вызывают ощущение запаха.

К мысли о таком строении окружающих тел Демокрит приходил и другим путем.

Размышляя над вопросом, что будет, если мы начнем делить какое-либо вещество, скажем ту же воду, на все более мелкие части, он невольно задумывался над тем, сможем ли мы продолжать это деление беспредельно.

Нет, отвечал философ, если делить воду достаточно долго на все более и более мелкие капельки, то мы получим наконец такие частички воды, которые дальше уже делить будет нельзя.

Демокрит назвал эти мельчайшие, неделимые далее частички, из которых состоят вода и все другие тела, а т о м а м и, что по-гречески означает «неделимые».

Вот как сформулировал он свое учение об атомах:

«Ничто не существует, кроме атомов и пустого пространства. Все прочее есть мнение. Сладкое существует только во мнении, во мнении существует тепло, холод, цвета... Атомы бесконечны в числе и бесконечно различны по форме».

«Различие всех предметов зависит от различия их атомов в числе, величине, форме и

[1] Подробнее об этом говорится в книге В. А. Мезенцева «Рассказ о строении вещества».

порядке; качественного различия атомов не существует».

В 1647 г. француз Пьер Гассенди издал книгу, в которой развил дальше учение Демокрита. Он попытался объяснить, каким именно образом могут возникать и возникают в мире миллионы разнообразных тел природы. Для этого, утверждал он, не нужно большого числа различных атомов. Ведь атомы — это все равно, что строительный материал для домов. Из трех различных видов строительных материалов — кирпичей, досок и бревен — можно построить огромное число самых разнообразных домов. Точно так же из нескольких десятков различных атомов природа может создать многие тысячи разнообразнейших тел. При этом в каждом теле различные атомы соединяются в небольшие группы.

Эти группы Гассенди назвал молекулами, т. е. «массочками» (от латинского слова «молес» — масса).

Молекулы различных тел отличаются друг от друга числом входящих в них атомов и видом («сортом») этих атомов. Нетрудно сообразить, что из нескольких десятков различных атомов можно создать огромное количество различных их комбинаций — молекул. Вот почему так велико разнообразие окружающих нас тел.

Однако многое еще во взглядах Гассенди было ошибочно. Так, он считал, что имеются особые атомы тепла, холода, вкуса и запаха. Как и другие ученые того времени, он не мог полностью освободиться от влияния Аристотеля, от признания его невещественных элементов.

В сочинениях М. В. Ломоносова, великого просветителя и основателя науки в России, содержатся уже другие мысли, получившие подтверждение на опыте много позднее.

Ломоносов пишет, что молекула может быть однородной и разнородной. В первом случае в молекулы группируются однородные атомы. Во втором — молекула состоит из атомов, отличных друг от друга. Если какое-либо тело составлено из однородных молекул, то это тело надо считать простым. Наоборот, если тело состоит из молекул, построенных из различных атомов, такое тело Ломоносов называет смешанным.

Теперь мы хорошо знаем, что различные тела природы имеют именно такое строение. В самом деле, возьмем, например, газ кислород: в каждой его молекуле содержится по два одинаковых атома кислорода. Это — молекула простого вещества. Если же атомы, составляющие молекулы, различны,— это уже «смешанное», сложное химическое соединение. Молекулы такого соединения состоят из атомов тех химических элементов, которые входят в состав этого соединения. Например, молекула воды состоит из одного атома кислорода и двух атомов водорода.

Можно сказать и иначе — каждое простое вещество построено из атомов одного химического элемента; сложное вещество включает в себя атомы двух и более элементов.

Таким образом, понятию сложного вещества отвечает молекула, состоящая из различных атомов. Простое вещество строится из молекул, состоящих из одинаковых атомов.

Многие ученые очень долго «не верили в атомы». Один из них писал еще в самом конце прошлого века, что через несколько десятилетий атомы «удастся разыскать лишь в пыли библиотек».

Сейчас подобные суждения кажутся смешными. Мы знаем теперь столь огромное число подробностей о «жизни» атома, что сомневаться в его существовании все равно, что подвергать сомнению реальность Черного моря. Конечно, доказательства существования атома пришли не сразу, но противники атома были «положены на обе лопатки» уже тогда, когда удалось «взвесить» атом.

Относительные веса атомов определили химики. Сначала за единицу атомного веса был принят вес атома водорода. Атомный вес азота оказался равным примерно 14, кислорода —16, хлора—35,5... Так как кислородные соединения наиболее распространены, то впоследствии был

сделан несколько иной выбор относительных единиц атомного веса, в которых число 16,000 приписывалось кислороду. Атомный вес водорода оказался равным в этой шкале 1,008.

Рядом интересных опытов физикам удалось измерить абсолютный вес атомов. Так как относительные веса известны, то для этого достаточно было измерить в граммах вес атома какого-либо одного вещества, например водорода.

Разумеется, физики не изготовляли весов, на которые можно положить один атом и уравновесить его гирькой. Вес атома определялся косвенными измерениями. Например, с помощью электронного микроскопа или рентгеновских лучей можно измерить величину объема (приходящегося на одну молекулу). С другой стороны, плотность вещества устанавливается простыми измерениями. Если умножить плотность на объем, то будет найдена масса молекулы в граммах.

Масса атома с атомным весом, равным единице, оказалась равной

$$m_0 = 1{,}66 \cdot 10^{-24} г.$$

Чтобы получить вес атома в граммах, надо умножить относительный атомный вес на m_0.

Представить себе малость этой величины можно, если вообразить, что у каждого человека на земном шаре (а население Земли более двух миллиардов) вы потребуете по миллиарду атомов. Сколько вещества соберете вы таким образом? Всего несколько миллионных долей грамма.

Или такое сравнение: земной шар во столько же раз тяжелее яблока, во сколько раз яблоко тяжелее атома водорода.

Обратная величина от m_0 носит название числа Авогадро:

$$N = \frac{1}{m_0} = 6{,}023 \cdot 10^{23}.$$

Это огромное число имеет следующий важный смысл. Возьмем вещество в таком количестве, чтобы число граммов его веса равнялось относительному весу атома или молекулы M. Такое количество называется 1 грамм-атом или 1 грамм-молекула (часто для краткости вместо грамм-молекула говорят «моль»). Вес молекулы в граммах равен $M \cdot m_0$. Поэтому число молекул в грамм-молекуле любого вещества

$$\frac{M}{M m_0} = N$$

равно числу Авогадро.

ДВИЖЕНИЕ МОЛЕКУЛ

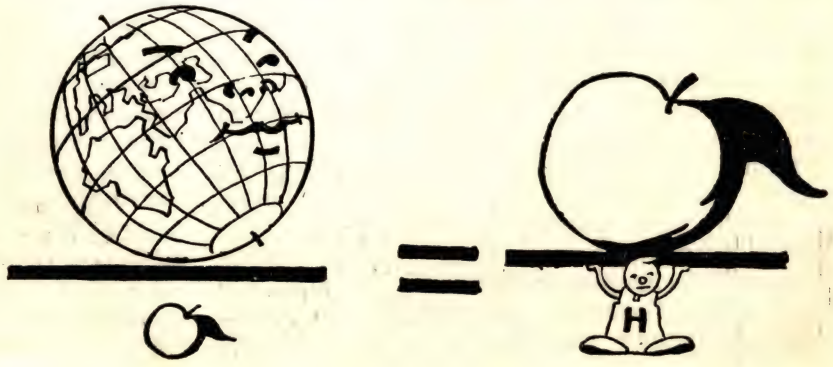
Чем отличается горячее тело от холодного? На этот вопрос еще совсем недавно, вплоть до начала XIX в., отвечали так: горячее тело содержит больше теплорода (или теплотвора), чем холодное. Совершенно так же, как суп более соленый, если содержит больше соли. Ну а что такое теплород? На это следовал ответ: «Теплород — это тепловая материя, это элементарный огонь». Таинственно и непонятно.

Наряду с теорией теплорода уже давно существовал другой взгляд на природу теплоты. Его отстаивали многие выдающиеся ученые XVI—XVIII столетий.

Фрэнсис Бэкон в своей книге «Novum Organum» писал: «... сама теплота в своей сущности есть не что иное, как движение... теплота состоит в переменном движении мельчайших частей тела».

Роберт Гук в книге «Микрография» говорил: «...теплота есть непрерывное движение частей тела... нет такого тела, частички которого были бы в покое».

Особенно отчетливые высказывания такого рода мы находим у Ломоносова в его работе «Размышление о причине теплоты и холода». В этом сочинении отрицается существование теплорода и говорится, что «теплота состоит



во внутреннем движении частичек материи».

Очень образно говорил Румфорд в конце XVIII в.: «...тело тем горячее, чем интенсивнее движутся частички, из которых оно построено, подобно тому как колокол звучит тем громче, чем сильнее он колеблется».

В этих замечательных догадках, намного опередивших свое время, кроются основы наших современных взглядов на природу теплоты.

Бывают иногда тихие ясные дни. Листочки на деревьях замерли, даже легкая рябь не возмутит водной глади. Все окружающее застыло в строгой торжественной неподвижности. Покоится видимый мир. Но что при этом происходит в мире атомов и молекул?

Физика наших дней может много рассказать об этом. Никогда, ни при каких условиях не прекращается невидимое движение частичек, из которых построен мир.

Почему же мы не видим всех этих движений? Частицы движутся, а тело покоится. Как это может быть? Не приходилось ли вам когда-либо наблюдать рой мошек? В безветренную погоду рой как бы висит в воздухе. А внутри роя идет интенсивная жизнь. Сотни насекомых мечутся вправо и влево, вверх и вниз, а весь рой, тем не менее, остается на месте, не меняя своей формы.

Невидимые движения атомов и молекул в теле носят такой же хаотический, беспорядочный характер. Если какие-то молекулы ушли из некоторого объема, то на их место поступили другие. А так как новые пришельцы ничуть не отличаются от ушедших молекул, то тело остается все тем же. Беспорядочное, хаотическое движение частиц не меняет свойств видимого мира.

Но что же заставляет двигаться атомы и молекулы? Ответ прост и полон глубокого смысла: ничто. Хаотическое движение — это неотъемлемое свойство любой частицы мироздания.

«Однако не пустой ли это разговор? — может спросить нас читатель.— Ведь никто не видел вечного теплового движения частичек вещества».

Доказательство теплового движения частичек можно получить с помощью самого скромного микроскопа.

Более ста лет назад английский ботаник Броун, рассматривая под микроскопом внутреннее строение растения, заметил, что крошечные частички вещества, плавающие в соке растения, беспрерывно движутся во всех направлениях. Ботаник заинтересовался: какие силы заставляют частички двигаться? Может быть, это какие-то живые существа? Ученый решил рассмотреть под микроскопом мелкие частички глины, взмученные в воде. Но и эти, несомненно, неживые частички тоже не находились в покое; они были охвачены непрерывным хаотическим движением. Чем меньше были взвешенные частички, тем быстрее они двигались. Долго смотрел он в микроскоп, но так и не мог дождаться, когда движение частичек прекратится.

Движение взвешенных частиц, которое наблюдал Броун, происходит под воздействием теплового движения молекул воды.

Прямыми опытами можно показать, что интенсивность теплового движения зависит от температуры. Нагреем тело — частички убыстрят свой вечный ход, охладим — темп движения замедлится.

Тепловое движение присуще большим и малым частичкам, сгусткам молекул, отдельным молекулам и атомам.

КАК ПОСТРОЕНЫ МОЛЕКУЛЫ

Молекулы состоят из атомов. Атомы связаны в молекулы силами, которые называют химическими.

Существуют молекулы, состоящие из двух, трех, четырех и более атомов. Наиболее крупные молекулы — молекулы белков — состоят из десятков и даже сотен тысяч атомов.

Царство молекул обладает исключительным разнообразием. Уже сейчас химики выделили из природных веществ и создали в лабораториях около миллиона веществ, построенных из разных молекул.

Свойства молекул определяются не только тем, сколько атомов того или иного сорта участвует в их постройке, но и тем, в каком порядке и в какой конфигурации они соединены. Молекула — это не груда кирпичей, а сложная архитектурная постройка, где каждый кирпич имеет свое место и своих вполне определенных соседей. Атомная постройка, образующая молекулу, может быть в большей или меньшей степени «жесткой». Во всяком случае, каждый атом совершает колебание около своего положения равновесия. В некоторых случаях одни части молекулы могут вращаться по отношению к другим частям, придавая свободной молекуле в процессе ее теплового движения различные и самые причудливые формы.

Находясь на больших расстояниях, атомы притягиваются друг к другу. Сила взаимодей-

ствия весьма быстро уменьшается с расстоянием и становится ничтожно малой уже на относительно небольших расстояниях. При сближении сила притяжения возрастает и достигает своего наибольшего значения уже тогда, когда атомы подойдут друг к другу очень близко. При еще большем сближении притяжение ослабевает и, наконец, на каком-то расстоянии исчезает совсем. Это расстояние называется равновесным. При сближении атомов до расстояний, меньших равновесного, возникают силы отталкивания, которые очень резко нарастают, и дальнейшее уменьшение расстояния становится практически невозможным.

Взаимодействие атомов или других частиц можно представить графически особой кривой, которую называют кривой взаимодействия или потенциальной кривой (точное название — кривая потенциальной энергии). Смысл ее легко понять, сравнивая эту кривую с профилем вырытой в земле ямы. Если в такую яму вкатить мячик, то он расположится на дне. Дно ямы соответствует минимуму потенциальной энергии. В этом положении действующие на мячик силы уравновешиваются. Разумеется, мячик не может находиться в равновесии, когда он лежит на краю ямы. В таком положении на мячик действует сила, которая велика в тех точках, где край ямы крутой, и мала там, где край ямы пологий. По мере подъема мячика растет его потенциальная энергия, равная, как известно из механики, произведению веса на высоту подъема.

Таким образом, по виду профиля ямы можно сразу же сказать, чему равны потенциальная энергия и действующая на тело сила для каждой точки профиля. Именно эти сведения и нужны для того, чтобы можно было охарактеризовать взаимодействие частиц.

На рис. 1 изображена кривая потенциальной энергии двухатомной молекулы. Каждая точка кривой показывает значение потенциальной энергии для того или иного межатомного расстояния. Расстояние отложено по горизонтальной оси, и началу отсчета соответствует невозможное положение — нулевое межатомное расстояние. Кривая имеет характерный ход для атомов разных сортов — сначала идет вниз, затем изгибается, образуя «яму», и потом более постепенно становится параллельно горизонтальной оси, по которой отложено расстояние между атомами.

Мы знаем, что устойчиво то состояние, в котором потенциальная энергия имеет наименьшее значение. Когда атом входит в состав моле-

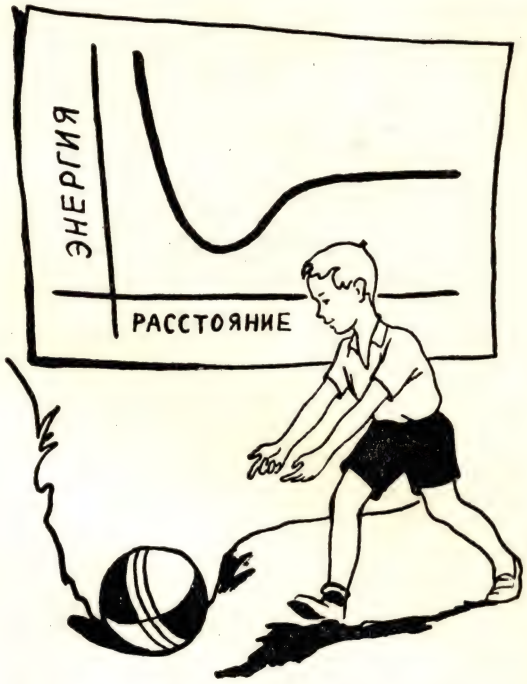


Рис. 1. Энергия двухатомной молекулы зависит от расстояния между атомами. Минимальная энергия соответствует равновесному расстоянию между атомами.

кулы, он «сидит» в потенциальной яме, совершая небольшие тепловые колебания около положения равновесия. Положению равновесия соответствует дно ямы. Поэтому расстояние от дна ямы до начала отсчета называют равновесным. На этом расстоянии расположились бы атомы, если бы прекратилось тепловое движение.

Равновесные расстояния (ниже мы будем говорить коротко — расстояния) между атомами различны для разных видов атомов.

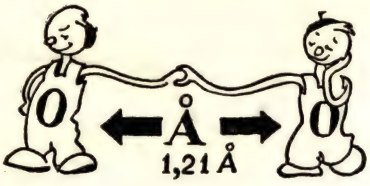
Кроме расстояния от начала отсчета до дна ямы, различного для разных атомов, важное значение имеет глубина ям. Глубина ямы имеет простой смысл: чтобы выкатиться из ямы, нужна энергия, по крайней мере равная глубине. Поэтому глубину ямы можно назвать энергией связи частиц.

Расстояния между атомами в молекулах столь малы, что для их измерения пришлось выбрать и подходящие единицы. Иначе пришлось бы выражать их значения в таком виде:

0,0000000121 *см*

(это мы записали цифру, выражающую расстояние между атомами в молекуле кислорода).

Единица, особенно удобная для описания атомного мира, называется ангстремом (правда, фамилия шведского ученого, именем ко-



торого названа эта единица, правильно читается Онгстрем; для напоминания об этом над буквой А поставлен значок: Å);

$$1Å = 10^{-8}\ см,$$

т. е. одной стомиллионной доле сантиметра.

Расстояние между атомами, входящими в состав молекул, лежат в пределах от 1 до 4 ангстрем. Записанное выше в сантиметрах равновесное расстояние для кислорода равно 1,21 Å.

Межатомные расстояния, как вы видите, очень малы. Если опоясать земной шар по экватору веревкой, то длина этого «пояса» во столько же раз будет больше ширины вашей ладони, во сколько раз ширина ладони больше расстояния между атомами в молекуле.

Для измерения энергии связи атомов пользуются обычно калориями, но относят их не к одной молекуле, что дало бы, разумеется, ничтожную цифру, а к грамм-молекуле, т. е. к числу граммов, равному относительному молекулярному весу.

Энергия связи атомов в молекуле, как и межатомные расстояния, колеблется в незначительных пределах. Для того же кислорода энергия связи равна 116 тыс. калорий на моль, для водорода — 103 тыс. калорий на моль, и т. д.

Энергию связи, приходящуюся на одну молекулу, получим, разделив эти величины на $6{,}023 \cdot 10^{23}$ (число Авогадро). Конечно, здесь получаются ничтожные числа порядка 10^{-19} калорий.

Мы уже говорили о том, что атомы в молекулах располагаются вполне определенным образом друг по отношению к другу, образуя в сложных случаях весьма замысловатые постройки.

Приведем несколько простых примеров. Молекулы из трех атомов бывают линейные (все три атома расположены в ряд) и уголковые (связи между атомами образуют тупой угол). Линейной является молекула CO_2 — углекислого газа, а уголковой (угол 105°) — молекула воды H_2O.

В молекуле аммиака NH_3 атом азота находится в вершине трехгранной пирамиды, в молекуле метана CH_4 атом углерода находится в центре четырехгранной фигуры с равными сторонами, которая называется тетраэдром.

Атомы углерода в молекуле бензола C_6H_6 образуют правильный шестиугольник. Связи атомов углерода с водородом идут под углом 120°. Все атомы расположены в одной плоскости.

Схемы расположения центров атомов в молекулах бензола и нафталина показаны на рисунке. Линии символизируют связи (рис. 2).

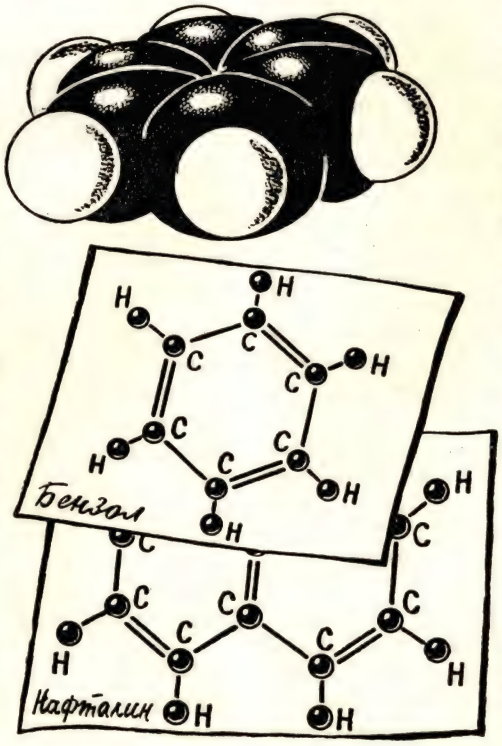


Рис. 2. Схема расположения атомов в молекулах бензола и нафталина. В бензоле шесть атомов углерода и шесть атомов водорода. Молекула нафталина родственна бензолу: ее атомы углерода расположены по углам двух шестиугольников, имеющих одну общую сторону. В нижней части рисунка показаны скелеты молекул, в верхней — объемная модель молекулы бензола. При соединении в молекулу атомы водорода (белые) и углерода (черные) как бы спрессовались, и молекула приобрела такую странную форму.

КАК ИЗМЕРЯЮТ МОЛЕКУЛЫ

Всего каких-нибудь полтораста лет назад путешествие из Европы в Америку занимало много месяцев и было сопряжено с большими трудностями. Теперь такое путешествие можно совершить за 8—10 часов — столь далеко ушла техника.

Современные методы измерения молекулы так же отличаются от первоначальных способов, использовавшихся для этой цели, как современные самолеты от парусного корабля.

Еще 30 лет назад казалось невозможным увидеть

молекулу. Сегодня электронные микроскопы позволяют рассмотреть детали размером до 7 Å. Таким образом, более или менее крупные молекулы видны непосредственно в микроскоп и их размеры могут быть установлены прямым измерением. Дальнейшее развитие техники обещает в ближайшие годы получить возможность видеть мельчайшие частицы размером до 1—2Å. Тогда станет возможным измерять межатомные расстояния. Большие трудности на этом пути создает тепловое движение — оно размазывает картину совершенно так же, как портит фотографию ребенок, который никак не может усидеть спокойно перед объективом фотоаппарата.

Точная величина молекул и атомов, правильнее говоря, величина межатомных расстояний, получена косвенными путями, а именно методами оптической спектроскопии, радиоспектроскопии, рентгеноструктурного анализа, электронографии.

Из всех этих способов исследования наиболее эффективным надо считать рентгеноструктурный анализ. Рентгеновские лучи представляют собой электромагнитные волны очень малой длины — того же порядка величины, что и межатомные расстояния, т. е. 1—2Å.

Хорошо изучено поведение световых лучей при попадании на так называемую дифракционную решетку, например прозрачную пластинку с нанесенными на нее штрихами.

Простое рассуждение показывает, что угол, образованный отклоненным лучом и нормалью к решетке, определяется отношением длины волны к размерам «щели» решетки. Чтобы лучи отклонялись сильно, длина волны должна быть несколько меньше, чем расстояние между щелями. Штрихи дифракционной решетки как раз и наносятся так, чтобы это условие было соблюдено. Если длина волны света известна, то измерением угла отклонения можно определить размер «щели» в решетке.

Сущность метода рентгеноструктурного анализа заключается в использовании кристалла как дифракционной решетки для рентгеновских лучей. Атомы, из которых построен кристалл, играют роль «штрихов». Межатомные расстояния и длины волн рентгеновских лучей близки друг к другу. Поэтому всегда можно подобрать волну такой длины, которая давала бы достаточно большое отклонение падающих на кристалл лучей от первоначального направления. Измеряя угол отклонения и зная длину волны, можно с большой точностью определить расстояние между атомами.

Если размеры молекулы известны, то легко вычисляется число молекул в единице объема. Зная плотность вещества, определяют массу молекулы. Таков один из многих путей, которыми современная физика решает вопросы измерения мельчайших частиц и расстояний между ними.

ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ МОЛЕКУЛ

Молекулы взаимно притягиваются — в этом невозможно сомневаться. Если бы на какое-то мгновение молекулы перестали притягиваться, то все жидкие и твердые тела распались бы и весь мир превратился в газ.

Молекулы отталкиваются, и это несомненно, так как иначе жидкость сжималась бы так же легко, как и газ.

Между молекулами действуют силы, во многом похожие на межатомные силы, о которых мы говорили выше. На больших расстояниях молекулы притягиваются слабо, при сближении сила их взаимодействия сначала растет, затем падает до нуля; при дальнейшем сближении молекулы отталкиваются.

Кривая потенциальной энергии, которую мы только что рисовали для атомов, правильно передает и основные черты взаимодействия молекул. Однако между этими взаимодействиями имеются и существенные различия.

Сравним между собой, например, равновесное расстояние между атомами кислорода, образующими молекулу, и атомами кислорода двух соседних молекул, притянувшихся до равновесного расстояния. Различие будет очень заметным: атомы кислорода, образующие молекулу, устанавливаются на расстоянии 1,21Å, атомы кислорода разных молекул подойдут друг к другу на 2,8 Å.

Равновесные расстояния атомов, связанных в молекулу, всегда меньше равновесных расстояний между теми же атомами, принадлежащими разным молекулам.

На языке потенциальной кривой это значит: яма для атомов, связанных в молекулу, расположена ближе к началу координат, чем яма для атомов соседних молекул.

Итак, повторяем, атомы двух соседних молекул устанавливаются на более далеком расстоянии друг от друга, чем атомы, составляющие молекулу. Отсюда вытекает предположение, что молекулы легче оторвать друг от друга, чем атомы. Так оно и есть в действительности. Если энергия, необходимая для разрыва связи между

атомами кислорода, образующими молекулу, равна, как говорилось выше, 116 тыс. калорий на моль, то энергия на «растаскивание» двух молекул кислорода равна всего 2 тыс. калорий на моль.

Значит, на кривой потенциальной энергии молекул яма будет не только лежать дальше, но и будет менее глубокой.

Но этим не исчерпывается различие между взаимодействиями атомов, образующих молекулу, и взаимодействиями молекул.

Химики показали, что атомы сцепляются в молекулу с ограниченным числом соседей. Если два атома водорода образовали молекулу, то третий атом уже не присоединится к ним для этой цели. Атом углерода не может образовать молекулу более чем с четырьмя соседями, и т. д. Это важное для химии свойство носит название валентности атомов.

Ничего подобного мы не находим в межмолекулярном взаимодействии. Притянув к себе одного соседа, молекула ни в какой степени не теряет своей «притягательной силы». Подход соседей будет происходить до тех пор, пока хватит места.

Взаимодействие между молекулами может играть бóльшую или меньшую роль в «жизни» молекул вещества. В свою очередь роль взаимодействия молекул вещества зависит от теплового движения. Чем тепловое движение интенсивнее, тем меньше проявляется молекулярное взаимодействие. Три состояния вещества — газообразное, жидкое и твердое — различаются той ролью, которую играет в их существовании взаимодействие молекул.

ТРИ СОСТОЯНИЯ ВЕЩЕСТВА

Слово газ происходит от греческого слова «хаос», что значит «беспорядок».

И действительно, газообразное состояние вещества является примером осуществляющегося в природе полного, совершенного беспорядка во взаимном расположении и движении частиц.

Нет такого микроскопа, который позволил бы увидеть движение газовых молекул, но, несмотря на это, физики могут достаточно детально описать жизнь этого невидимого мира.

В кубическом сантиметре воздуха при нормальных условиях (комнатная температура и атмосферное давление) находится огромное число молекул, примерно $2{,}7 \cdot 10^{19}$ (т. е. 27 миллиардов миллиардов молекул). На каждую молекулу приходится объем около $0{,}4 \cdot 10^{-19}$ *см*^{3}, т. е. кубик со стороной примерно $0{,}35 \cdot 10^{-6}$ *см*. Однако молекулы очень малы. Например, молекулы кислорода и азота — основная часть воздуха — имеют размер около 5Å, т. е. $5 \cdot 10^{-8}$ *см*. Таким образом, среднее расстояние между молекулами примерно в 10 раз больше размера молекулы. А это в свою очередь означает, что средний объем газа, на который приходится одна молекула, примерно в 1000 раз больше объема самой молекулы.

Представьте себе ровную площадку, на которой беспорядочно разбросаны монеты, причем на площадь в 1 *м*^{2} приходится в среднем сто монет. Приблизительно так же редко расположены газовые молекулы (рис. 3).

Каждая молекула газа находится в состоянии непрерывного теплового движения. Проследим за одной молекулой. Вот она стремительно движется куда-то вправо. Если бы на ее пути не встретилось препятствий, то она с той же скоростью продолжала бы свое движение по прямой линии. Но путь молекулы пересекают ее бесчисленные соседи. Столкновения неминуемы, и молекулы разлетаются, как два столкнувшихся бильярдных шара. В какую сторону отскочит молекула, увеличится или уменьшится ее скорость? Все возможно: ведь встречи могут быть самые различные. Удар более быстрой молекулы сзади увеличит скорость нашей молекулы, встреча спереди замедлит ее. Боковые удары могут

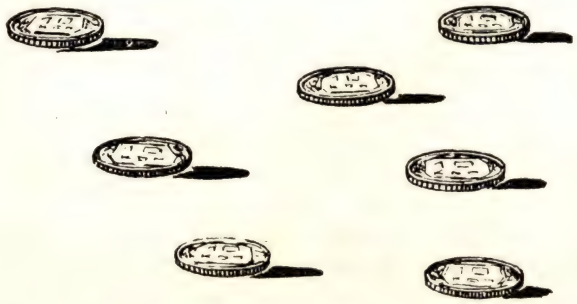


Рис. 3. Так редко расположены в каждое мгновение молекулы газа.

быть нанесены справа и слева, сильно и слабо. Ясно, что, подвергаясь таким беспорядочным соударениям в результате этих случайных встреч, молекула, за которой мы наблюдаем, будет непрерывно метаться по сосуду, в котором заключен газ.

Какой путь удается молекулам газа пробежать без столкновения? В этом отношении газ надо охарактеризовать средними величинами, так как время свободного пробега от одного соударения до другого будет изменяться в широких пределах. При этом, разумеется, нет никакой закономерной связи между двумя пробегами, следующими друг за другом.

Средняя длина пробега будет зависеть от размеров молекул и от плотности газа. Чем больше размеры молекул и число их в сосуде, тем чаще они будут сталкиваться между собой. Средняя длина пути, пробегаемого молекулой без соударения, равна при нормальных условиях 10^{-5} *см* = 1000Å для водорода и $5 \cdot 10^{-6}$ *см* = 500Å для более крупной молекулы кислорода. Расстояние 10^{-5} *см* — десятитысячная доля миллиметра — очень малое, но по сравнению с размерами молекул оно далеко не мало. Пробег молекулы в 10^{-5} *см* соответствует пробегу бильярдного шара в 25 *м*.

Строение жидкости существенно отличается от строения газов. Причина в том, что роль межмолекулярных сил для жидкостей весьма существенна и соседние молекулы проводят довольно значительную часть своей жизни в ямах потенциальных кривых взаимодействия молекул.

Общее между жидкостью и газом заключается в совершенно беспорядочном расположении молекул. Отличие жидкости от газа состоит лишь в более тесном расположении молекул.

Из-за большой тесноты молекулы жидкости не могут двигаться так свободно, как в газе. Каждая молекула почти все время «топчется» на одном и том же месте в окружении тех же соседей и только понемногу перемещается. Чем жидкость более вязкая, тем это движение менее значительно.

Совсем решительно расправляются силы взаимодействия частиц вещества с их тепловым движением в твердых телах. В твердом веществе частицы практически все время находятся в потенциальных ямах. Единственно возможное движение — это колебание около положений равновесия. Отсутствие поступательных перемещений частиц и есть причина того, что твердое тело — твердое.

КРИСТАЛЛЫ

Кристаллы... Многие думают, что это красивые, редко встречающиеся камни. Они бывают разных цветов, в большинстве своем прозрачны и, что самое замечательное, обладают красивой, правильной формой. Обычно кристаллы представляют собой многогранники, стороны (грани) их идеально плоские, ребра — строго прямые. Они радуют глаз чудесной игрой света в гранях, удивительной правильностью строения.

Есть кристаллы скромные, например кристаллы каменной соли — природного хлористого натрия, т. е. обычной поваренной соли. Они встречаются в природе в виде прямоугольных параллелепипедов или кубиков. Простая форма и у кристаллов кальцита — прозрачных косоугольных параллелепипедов.

Куда сложнее кристаллы кварца. У каждого кристаллика множество граней разной формы, пересекающихся по ребрам разной длины.

Кристаллы окружают нас повсюду. Твердые тела, из которых мы строим дома и делаем станки, вещества, которые мы употребляем в быту,— почти все они относятся к кристаллам. Почему же мы этого обычно не замечаем? Дело в том, что мы редко находим в природе тела в виде отдельных одиночных кристаллов (или, как говорят, монокристаллов). Чаще всего вещество встречается в виде прочно сцепившихся мельчайших кристаллических зернышек. Каждое из этих зернышек меньше тысячной доли миллиметра. Такую структуру можно увидеть лишь в микроскоп.

Тела, состоящие из кристаллических зернышек, называются мелкокристаллическими или поликристаллическими («поли» — много). Их, конечно, тоже надо отнести к числу кристаллов. Тогда окажется, что почти все окружающие нас твердые тела—кристаллы. Песок и гранит, медь и железо, салол, продающийся в аптеке, и сухие краски—все это кристаллы.

Есть, однако, и исключения: стекло и пластмассы не состоят из кристаллов. Такие твердые тела называются аморфными.

Итак, изучать кристаллы — это значит изучать почти все окружающие нас тела. Понятно, как это важно.

Одиночные кристаллы сразу же узнаются по правильности их формы. Плоские грани и прямые ребра являются характерным свойством кристалла; правильность формы, несомненно, связана с правильностью внутреннего строения кристалла.

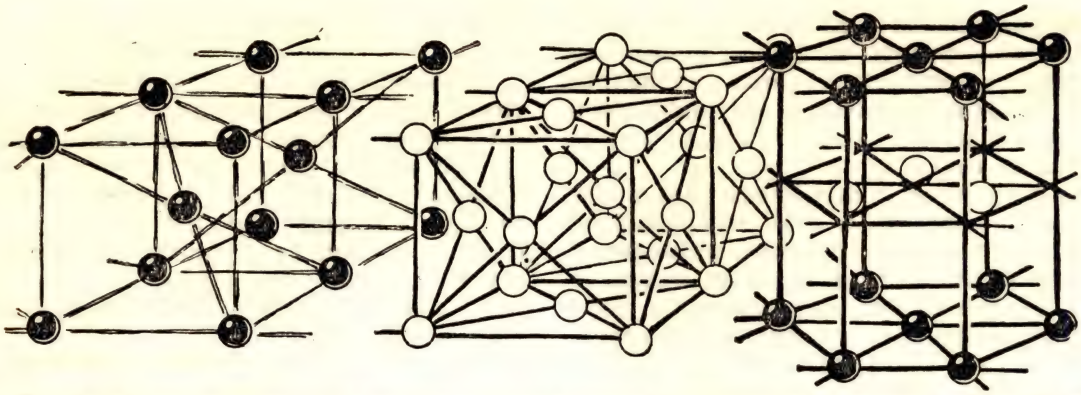


Рис. 4. Три типа распространенных кристаллических решеток одноатомных веществ. Слева — вольфрам; в центре — медь; справа — магний.

Но представьте себе, что из крупного кристалла изготовлен шар. Удастся ли сообразить, что в руках у нас кристалл, и отличить этот шар, скажем, от стеклянного шара? Да, удастся, потому что кристаллы обладают одной особенностью — их свойства зависят от того направления, в котором рассматривается кристалл. Так, в продольном сечении кристалла прочность, электропроводность, проводимость теплоты будут иными, нежели в поперечном. Эта особенность кристалла называется анизотропией его свойств. Анизотропный — это значит разный в разных направлениях.

Кристаллы анизотропны. Напротив, аморфные тела, жидкости и газы — изотропны, т. е. обладают одинаковыми свойствами в разных направлениях («изо» по-гречески — одинаково, «тропос» — направление).

Анизотропия свойств и позволяет узнать, является ли кристаллом кусочек вещества любой формы.

СТРОЕНИЕ КРИСТАЛЛОВ

Почему так красива и правильна форма кристалла? Грани его, блестящие и ровные, выглядят так, словно над ними поработал искуснейший шлифовальщик. Отдельные части кристалла повторяют друг друга, образуя красивую симметричную фигуру.

Ответ на этот вопрос может быть лишь один — внешней красоте должна отвечать внутренняя правильность. Эта правильность заключается в многократном повторении тех же основных частей.

Представьте себе парковую решетку, сделанную из прутьев разной длины и расположенных как попало. Безобразная картина! Хорошая решетка построена из одинаковых прутьев, расположенных в правильной последовательности на одинаковых расстояниях друг от друга.

Такую же самоповторяющуюся картину мы находим в обоях. Здесь элемент рисунка повторяется уже не в одном направлении, как в парковой решетке, а заполняет плоскость.

Какое же отношение имеют парковая решетка и обои к кристаллу? Самое прямое. Парковая решетка состоит из звеньев, повторяющихся вдоль линии, обои — из картинок, повторяющихся на плоскости, а кристалл — из групп атомов, повторяющихся в пространстве. Поэтому и говорят, что атомы в кристалле образуют пространственную (или кристаллическую) решетку.

В настоящее время известно строение многих сотен кристаллов. Расскажем о строении простейших кристаллов и прежде всего тех из них, которые построены из атомов одного вида.

Наиболее распространены три типа решеток. Они показаны на рис. 4. Шариками и кружочками изображены центры атомов; линий, их соединяющих, в действительности не существует. Они проведены лишь для того, чтобы объяснить читателю характер пространственного расположения атомов.

Левый и средний рисунок изображают кубические решетки. Чтобы представить себе эти решетки яснее, вообразите, что вы сложили простейшим способом — ребро к ребру, грань к грани — детские кубики.

Если теперь мысленно разместить точки по вершинам и центрам объемов кубов, то возникнет кубическая решетка, изображенная на левом рисунке. Такая структура называется кубической объемноцентрированной. Если

разместить точки по вершинам кубов и в центрах их граней, то возникнет кубическая решетка, изображенная на среднем рисунке. Она называется кубической гранецентрированной.

Третья решетка называется плотнейшей гексагональной (т. е. шестиугольной). Чтобы понять происхождение этого термина и яснее представить себе расположение атомов в такой решетке, возьмем большое количество бильярдных шаров и начнем укладывать их, стремясь создать наиболее плотную упаковку.

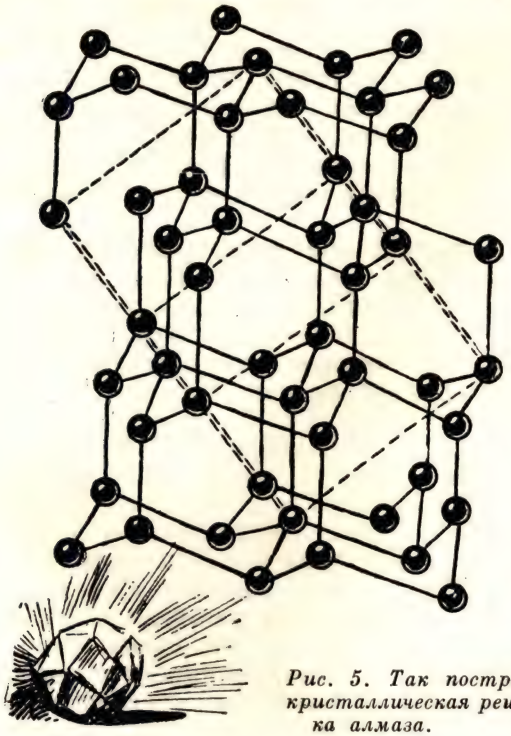


Рис. 5. Так построена кристаллическая решетка алмаза.

Прежде всего составим плотный слой — он выглядит так, как бильярдные шары, собранные «треугольником» перед началом игры. Отметим, что шар внутри треугольника имеет шесть соприкасающихся с ним соседей и эти шесть соседей образуют шестиугольник.

Продолжим укладку наложением слоев друг на друга. Если бы мы поместили шары следующего слоя непосредственно над шарами первого слоя, то такая упаковка была бы неплотной. Стараясь разместить в некотором объеме наибольшее число шаров, мы должны положить шары второго слоя в лунки первого, третьего слоя — в лунки второго, и т. д.В гексагональной плотнейшей упаковке шары третьего слоя размещены так, что их центры лежат над центрами шаров первого слоя.

Центры атомов в гексагональной плотнейшей решетке расположены так, как центры шаров, плотно уложенных описанным способом.

В трех решетках, которые здесь нарисованы, кристаллизуется почти половина элементов менделеевской таблицы. Например:

гексагональная плотнейшая упаковка — бериллий, магний, гафний;

кубическая гранецентрированная —серебро, алюминий, золото, медь;

кубическая объемноцентрированная — калий, барий, вольфрам.

Среди других структур упомянем лишь немногие. На рис. 5 изображена структура алмаза. Для этой структуры характерно то обстоятельство, что у атома углерода в алмазе имеются четыре ближайших соседа. Это число полезно сопоставить с соответствующими числами описанных только что трех наиболее распространенных структур. Как видно из рисунков, в плотнейшей гексагональной упаковке у каждого атома двенадцать ближайших соседей, столько же соседей у атомов, образующих

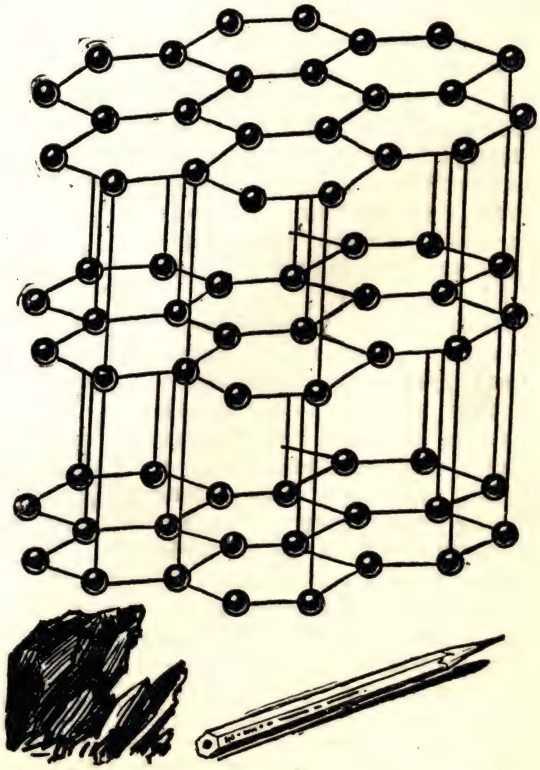


Рис. 6. Кристаллическая структура графита.

Рис. 7. Структура кристалла поваренной соли. Маленькие шары — атомы натрия, большие — атомы хлора.

гранецентрированную кубическую решетку; в объемноцентрированной решетке у каждого атома восемь соседей.

Еще несколько слов скажем о графите, строение которого показано на рис. 6. Особенность этой структуры бросается в глаза. Графит состоит из слоев атомов. Атомы одного слоя связаны между собой сильнее, чем атомы, принадлежащие соседним слоям. Это видно из величины межатомных расстояний: в одном слое расстояние между атомами в $2^1/_2$ раза меньше кратчайшего расстояния между слоями.

Наличие слабо связанных атомных слоев приводит к тому, что кристаллы графита легко расщепляются вдоль этих слоев. Поэтому твердый графит может служить смазочным материалом в тех случаях, когда невозможно применение смазочных масел, например если скорость движения трущихся частей очень мала, а также при высокой температуре. Усилие, достаточное для того, чтобы расщепить микроскопический графитовый кристаллик, много меньше сил трения, поэтому графитовая смазка значительно облегчает скольжение одного тела по другому.

Бесконечно разнообразны структуры кристаллов химических соединений. Крайними — в смысле различий — примерами могут служить структуры каменной (поваренной) соли и двуокиси углерода. Кристаллы каменной соли состоят из чередующихся вдоль осей куба атомов натрия и хлора (рис. 7).

Каждый атом натрия имеет шесть равноотстоящих соседей другого сорта. То же относится и к хлору. Но где же молекула хлористого натрия? Ее нет; в кристалле отсутствует не только группа из одного атома натрия и одного атома хлора, но и вообще какая бы то ни было группа атомов.

Химическая формула NaCl не дает нам оснований говорить: «Вещество построено из молекул NaCl». Химическая формула указывает лишь, что вещество построено из одинакового числа атомов натрия и хлора. Вопрос о существовании молекул у вещества решается структурой. Если в ней не выделяется группа близких атомов, то молекул нет. Кристаллы без молекул называются атомными.

Кристалл углекислого газа CO_2 (сухого льда, который лежит в ящиках у продавщиц мороженого) — пример молекулярного кристалла. Центры атомов кислорода и углерода молекулы CO_2 расположены вдоль прямой линии. Расстояние между ними равно 1,3 Å. А вот расстояние между атомами соседних молекул — около 3 Å.

Ясно, что при таких условиях мы сразу же «узнаем» молекулу в кристалле.

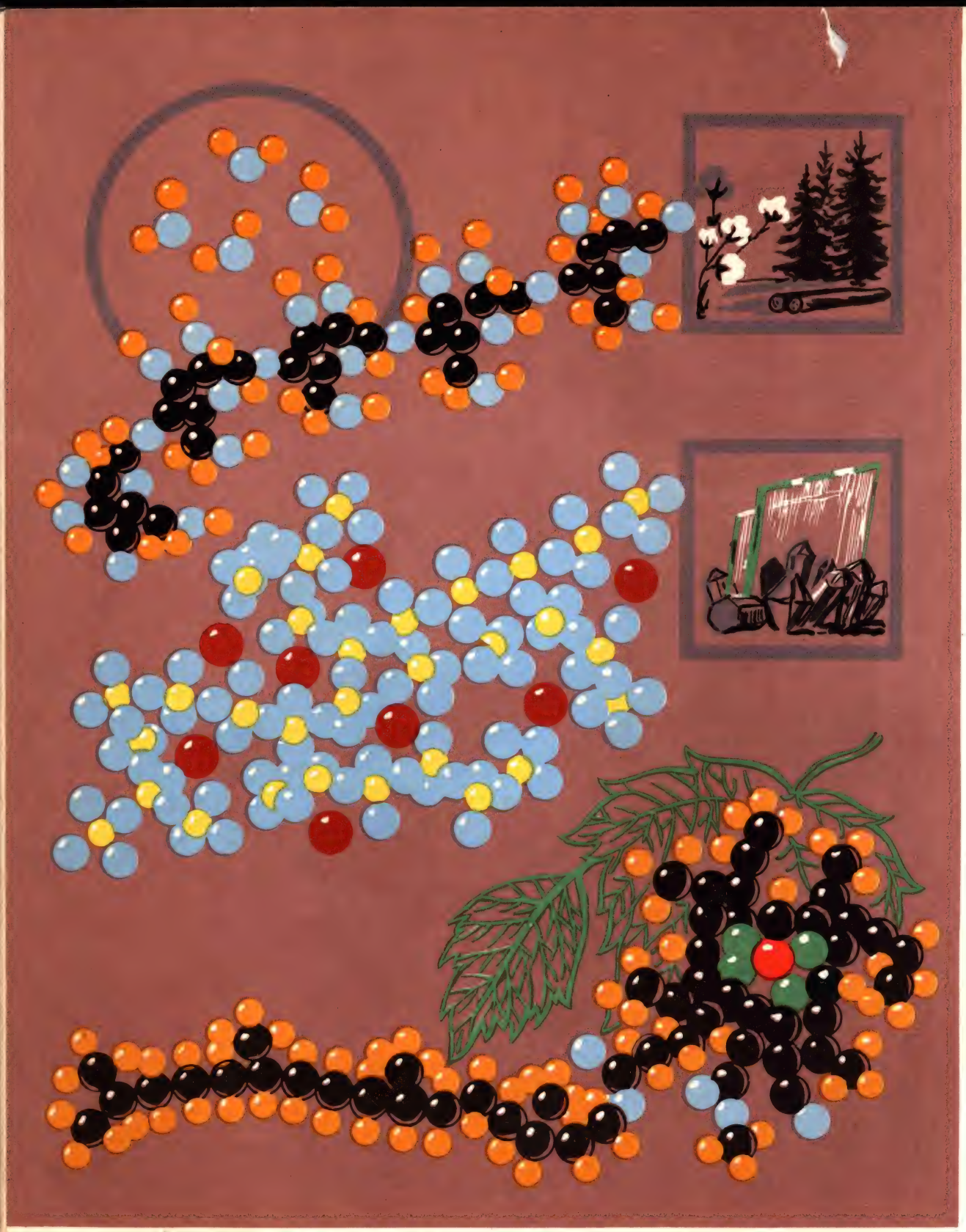
Молекулярные кристаллы представляют собой плотные упаковки молекул. Чтобы это видеть, надо обрисовать контуры молекулы. Это и сделано на рис. 8.

Рис. 8. Структура кристалла органического вещества, входящего в состав белка. Большие молекулы плотно прилегают друг к другу.

ПОРЯДОК И БЕСПОРЯДОК В МИРЕ АТОМОВ

Аккуратность — немалая добродетель. У хорошей хозяйки в бельевом шкафу вещи разложены по полочкам в строгом порядке: на одних полках рубахи, на других простыни — и в буфете посуда расставлена так, что глубокие тарелки находятся в одной стопке, мелкие — в другой... Естественно желание навести аналогичный порядок и в хозяйстве науки — «разложить по полкам», сгруппировать по каким-то характерным признакам отдельные явления, тела, законы природы. Такое группирование называется классификацией и часто приносит большую пользу науке, выявляя родственные черты различных явлений.

Таблица 17. Мы живем в мире кристаллов. Из них построены многие окружающие нас предметы. В верхней части рисунка — кристаллическая структура стали, в середине — сахарозы, внизу — пенициллина.



Однако во всякой классификации заложено противоречие. Попробуйте, например, разбить людей по росту на три группы: высоких, средних и маленьких.

Кого вы будете считать высоким? Ну, скажем, человека, рост которого больше 180 *см*. Придется тогда двух фактически одинаково высоких людей — одного с ростом 179,9 *см*, а другого с ростом 180,1 *см* «разнести» в разные группы.

С примером такого противоречия мы встречаемся в попытке разбить все окружающие нас тела на газообразные, жидкие и твердые. Вода — жидкость, а что такое смола, которой нагреванием можно придать любую степень вязкости? Ведь смолу можно непрерывно переводить из такого жидкого состояния, как вода, в такое твердое состояние, как дерево.

Но, может быть, неверно выбран признак классификации? Мы пытались разбить тела на группы по их свойству — твердости. Попробуем положить в основу не свойство, а строение тела.

На первый взгляд дело обстоит просто: прежде всего мы разбиваем тела на две группы. В одних телах атомы и молекулы уложены в строгом порядке — это кристаллические вещества, а другие построены из беспорядочно расположенных частиц. Во вторую группу попадают жидкости и газы. Характер расположения частиц в этих двух состояниях имеет много общего; главное различие заключается в плотности. Не удивительно, что всегда есть возможность непрерывным увеличением давления привести газ в такое плотное состояние, которое ничем не отличается от жидкости.

Казалось бы, две группы тел отличаются друг от друга совершенно четко. Что общего между структурой кристалла, атомы которого заполняют пространство регулярным повторением, и строением капли воды, молекулы которой собраны в тесную, но беспорядочную кучу. Действительно, разница между порядком и беспорядком в расположении частиц велика. Однако внимательное изучение природы показывает, что в упорядоченном расположении, как правило, присутствуют элементы беспорядка, что в беспорядочном расположении существуют элементы порядка и что существует множество тел, построенных таким образом, что их с одинаковым успехом можно отнести на «полки» как порядка, так и беспорядка.

На рис. 9 приведена фотография кристалла, снятая с помощью электронного микроскопа. Молекулы плотно уложены рядами, ряды уложены в слои, слои строят кристалл. Однако мы видим, сколь далека от совершенства упаковка молекул: в постройке много дефектов разного рода — тут и искривление рядов, и маленькие пустоты...Фотография изображает хороший кристалл. В природе встречаются кристаллы лучше

Рис. 9. Фотография кристалла болезнетворного вируса, развившегося на табачном листе. Кристалл построен из очень крупных молекул, которые удается рассмотреть с помощью электронного микроскопа. В фокусе находится поверхность одного из кристаллов. Другие кусочки объекта не попали в фокус и видны неразборчиво.

Таблица 18. На рисунке показаны структуры веществ различной степени упорядоченности. Наверху изображена часть молекулы целлюлозы. Молекулы целлюлозы укладываются одна вдоль другой и образуют довольно упорядоченную структуру. Целлюлозу нельзя отнести ни к кристаллическим, ни к аморфным телам. Стекло (посередине) является классическим представителем аморфных тел. Атомы стекла расположены беспорядочно, поэтому кусок стекла застывает из расплава в бесформенную (аморфную) массу. Правильную форму стеклянным изделиям придают шлифовкой. Внизу изображена молекула хлорофилла. Это вещество, как и целлюлозу, нельзя отнести ни к аморфным, ни к кристаллическим телам.

(в мире драгоценных камней), но большая часть кристаллов еще «хуже» по порядку в расположении частиц, чем тот кристалл, который показан на фотографии.

Нетрудно представить себе, что при возрастании числа дефектов сходство с парковой решеткой и обоями будет постепенно теряться, а проблема различения кристалла и жидкости перестанет быть само собой разумеющейся.

Мы пояснили, в чем заключаются элементы беспорядка в порядке кристаллического тела, а теперь надо сказать, в чем состоит упорядоченность жидкости. Упорядоченность молекул в жидкости является следствием тесноты их расположения. Каждая молекула будет окружена максимальным числом соседей. Это число равно 12 для молекул, форма которых более или менее близка к сферической. Для длинных молекул (в форме палочки) число ближайших соседей будет равно 6, как в пачке карандашей. Однако элементы порядка проявляются не только в числе ближайших соседей, но и во взаимной ориентации молекул. Из-за тесноты молекулы будут стремиться расположиться так, чтобы выступающие части одних пришлись на «впадины» других. В результате окажется, что все молекулы очень похожим образом окружены своими соседями — в этом и заключаются элементы порядка в беспорядке. Для многих вязких жидкостей этот вид порядка может быть выражен очень отчетливо (его называют ближним порядком). В кристаллах существует дальний порядок, который заключается в регулярном повторении частиц.

В природе существуют и такие тела, которые никак нельзя отнести ни к жидкостям, ни к кристаллам. В некоторых отношениях эти тела строго упорядочены, а в других отношениях обнаруживают полную хаотичность в расположении молекул. К их числу относятся жидкие кристаллы и газокристаллы.

Представьте себе выстроившийся по команде «смирно» полк солдат. Они стоят на одинаковых расстояниях друг от друга, правильными рядами. Кроме того, все они повернулись одинаково и смотрят в одну сторону. Такой строй можно сравнить со строем молекул в хорошем кристалле. Теперь допустим, что, сохраняя те же места, солдаты повернулись в разные стороны и смотрят «кто куда». До известной степени строй сохранил порядок: попрежнему одинаковы расстояния между соседями, по-прежнему отчетливо видны аккуратные ряды. В этом отношении порядок сохранился. Однако теперь сравнение с хорошим кристаллом отпадает. Но, оказывается, такой «вольный строй» имеет своих представителей и в мире твердых веществ. В ряде кристаллов молекулы образуют правильную решетку своими центрами или осями, но ориентации молекул беспорядочны.

Ярким примером такого строения могут служить частицы мыла. Молекулы мыла — длинные палочки. В твердом теле они располагаются слоями, каждый слой состоит из параллельных молекул, образуя подобие пачки карандашей. Когда мыло растворяют в воде, вода проникает между слоями, а слои продолжают свое существование и в растворе, но только не в виде выровненного строя, а в виде только что описанного вольного строя. Когда мы моем руки, слои палочковых молекул легко скользят друг по другу, захватывая своими цепкими концами частицы грязи. Поэтому-то мыло и моет.

МОЛЕКУЛЫ-ГИГАНТЫ

Металл, дерево, камень и стекло — вот материалы, из которых еще недавно было сделано подавляющее большинство предметов, окружавших человека. Сейчас к этим материалам прибавился еще один — пластмасса. Из пластмассы делают посуду, изготовляют паркет, облицовывают стены; из пластмассы выполняют детали машин, делают кузова автомобилей. Пластмасса ведет решительное наступление на старые материалы, успешно вытесняя их из самых различных областей жизни и техники.

Не меньшие изменения происходят в отношении материалов, идущих на изготовление одежды. До последнего времени одежда изготовлялась исключительно из естественных материалов — кожи и шерсти животных, а также из растений. Сейчас мы видим, как появляются все новые и новые изделия из искусственного волокна, знакомые всем под названиями — капрон, нейлон, перлон. Вслед за дамскими чулками последовало белье, появились костюмы, пальто, шубы... Из искусственных материалов изготовляется и значительная часть обуви. Процесс вытеснения старых материалов новыми только начался. Но уже для всех бесспорно, что будущее принадлежит искусственному волокну.

Пластмассы и волокна построены из молекул-гигантов, содержащих сотни тысяч атомов. Размеры таких молекул весьма велики, и их можно видеть с помощью электронного микроскопа.

Волокна построены из молекул, атомы которых вытянуты в цепочки. Большей частью молекула состоит из регулярно повторяющихся групп атомов. Если вытянуть такую молекулу в линию — обнаружится строгий порядок следования групп атомов. Порядок этот такого же типа, как в ряду атомов, образующих кристалл. Длина такой молекулы может достигать огромной (для атомного мира) величины — десятков и сотен тысяч ангстрем (т. е. доходить до сотых долей миллиметра). Волокно состоит из пачек таких длинных молекул. Пачки расположены в основном вдоль оси волокна, они переплетены между собой наподобие ниточек веревки.

Молекулы, составляющие пачку, могут выстроиться в весьма строгом порядке. Но обычно этот порядок не поддерживается вдоль всей длины пачки. Область строгой боковой укладки сменяется областью, в которой молекулы хотя и располагаются параллельно, но повернуты беспорядочно по отношению друг к другу. Области беспорядка и порядка могут многократно сменять друг друга. На фотографии, снятой в электронном микроскопе, мы видим пачки молекул (рис. 10). Так как области беспорядка менее плотны, чем области порядка, то чередование этих областей запечатлелось на снимке как чередование темных и светлых участков.

Многие пластмассы построены не из линейных, а из разветвленных молекул. Каждая молекула — это сложное дерево, состоящее из огромного числа ветвей. Молекулы перепутаны между собой, как деревья в сваленном лесу.

По своему строению пластмассы представляют типичный пример беспорядка в расположении атомов.

ПОЧЕМУ СТЕКЛО ХРУПКОЕ, А ГЛИНА МЯГКАЯ

Сильно сжатый теннисный мяч полностью восстанавливает свою форму после того, как давление снято. Легчайшее прикосновение пальцев к глине оставляет на ней отпечаток. Слабый удар разобьет стекло, но ничего не сделает со сталью.

Причины столь существенного различия свойств тел мы ищем в их структуре. Сопротивляемость тела сжатию, растяжению или изгибу зависит от характера взаимодействия его атомов и молекул. Попробуем прежде всего объяснить сущность основных механических свойств — упругости и пластичности. Упругим называется

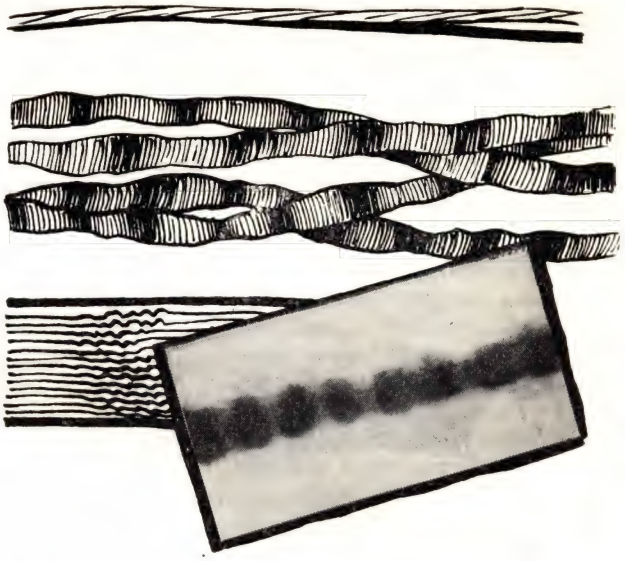


Рис. 10. Нить капрона состоит из вытянутых, слегка перепутанных пачек молекул-гигантов. Молекулы внутри пачки идут то в порядке, то в беспорядке. Такое чередование обнаруживается на фотографии, наложенной на схему. Эта фотография получена с волокна, пропитанного йодом. Молекулы йода проникли лишь в более рыхлые области беспорядка и отметили их.

такое тело, которое восстанавливает свою форму после того, как сила перестала действовать. К упругим телам относятся, например, сталь и мрамор.

Исследования показали, что при растяжении стали расстояние между каждой парой атомов возрастает, а при сжатии—уменьшается. При этом атомы не меняют своих соседей, можно сказать, остаются в тех же потенциальных ямах. Просто под действием внешней силы атом отходит от дна потенциальной ямы и несколько поднимается по стенке. Как только сила перестает действовать, атом возвращается на дно потенциальной ямы. Чтобы тело обладало заметной упругостью, стены потенциальной ямы должны быть достаточно пологими — только в этом случае атом удастся «откатить» от положения равновесия на значительное расстояние.

Теперь предположим, что внешняя сила, действующая на тело, способна «выкатить» атом из потенциальной ямы, т. е., иными словами, способна оторвать его от соседей. Возможен следующий случай: выкатившись из своей потенциальной ямы, атом «скатывается» в соседнюю — иными словами, оторвавшись от своих соседей, атом перехватывается другими атомами. После того как сила прекращает свое дейст-

вие, атом «сам по себе» не может вернуться в прежнюю потенциальную яму. Описанная картина соответствует свойству пластичности.

Итак, пластичность — это такое свойство, при котором атомы одной части тела способны перемещаться по отношению к атомам другой части тела, меняя своих соседей. Как же представить себе такое смещение? При пластическом изменении формы тела плоскости кристалла смещаются, «соскальзывают» друг относительно друга. Ясно, что соскальзывание происходит вдоль тех плоскостей кристалла, перпендикулярно к которым действуют наиболее слабые силы сцепления. Такие слабосвязанные плоскости имеются у глины, у олова, в слюде и графите. Во всех этих телах можно наблюдать соскальзывание одной части кристалла по отношению к другой (рис. 11).

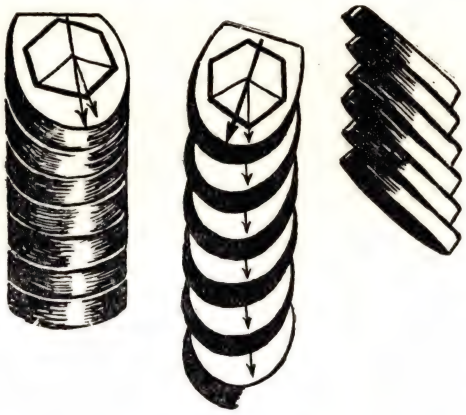


Рис. 11. Пластическая деформация кристалла заключается в образовании пачек скольжения. Соскальзывание пачки происходит в случайном месте (более слабом), но направление соскальзывания вполне определенным образом ориентировано по отношению к ребрам и граням кристалла.

Таким образом, пластичность возникает у тех тел, атомы которых без особого труда могут быть выведены внешней силой из своих потенциальных ям и, перевалив через край, сразу же попадают в соседнюю яму.

Остается объяснить характер взаимодействия атомов, образующих хрупкие тела, такие, как стекло или кирпич. В этих телах потенциальная яма имеет очень крутые стенки (отсутствие упругости), кроме того, соседние ямы разделены между собой широким плато, поэтому удаленный из потенциальной ямы атом не попадает в соседнюю яму.

Схемы потенциальных ям, характеризующих взаимодействие атомов в телах с разными механическими свойствами, показаны на рис. 12.

Было бы ошибочным предположение, что между хрупкими и пластичными телами нет ничего общего, что между ними лежит непроходимая пропасть. Если некоторые хрупкие материалы деформировать медленно, то они ведут себя, как пластические. Это и понятно: быстрота воздействия может придать атомам значительную кинетическую энергию, и межатомные связи окажутся порванными.

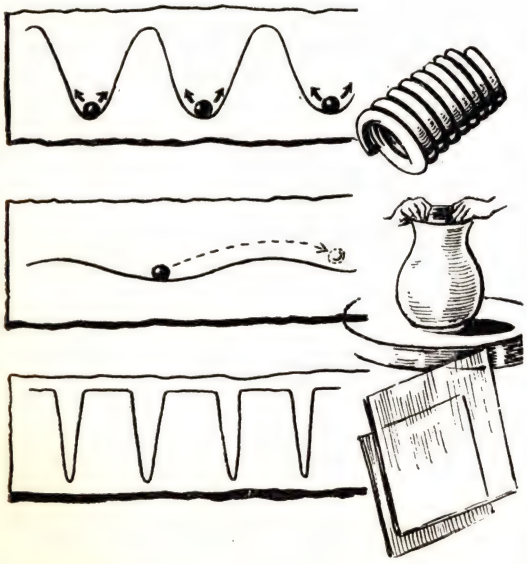


Рис. 12. Схемы, поясняющие связь механических свойств с силами взаимодействия между атомами. Наверху — упругое тело, в середине — пластичное и внизу — хрупкое.

Точно так же кристалл может вести себя и как хрупкий и как пластический материал, в зависимости от того, как повернуты слабосвязанные плоскости к направлению действия силы. Если эти плоскости расположены поперек направления растяжения, то соскальзывание становится невозможным и кристалл обнаруживает хрупкость.

Если плоскости расположены вдоль направления растяжения, то они будут скользить друг по другу, как карты в колоде, и кристалл обнаружит пластическое поведение.

Особенно запутанным будет поведение мелкокристаллического материала, хрупкость или пластичность которого зависит и от свойств отдельных кристалликов, и от их ориентации, и от их сцепления.

Замечательные упругие свойства резины и каучука связаны со своеобразным строением этих тел. В нерастянутой резине пачки молекул свернуты. Растяжение представляет собой разворачивание пачек; оно сопровождается улучшением бокового порядка в укладке молекул в пачки. После того как действие силы прекра-

тится, пачки молекул складываются в тот же порядок, в каком они находились до растяжения.

Если резина или каучук получили такое изменение формы, которое не снимается после прекращения действия силы, то это означает, что молекулы, составляющие пачку, перестроились и сменили своих соседей.

Механические свойства материалов в значительной степени зависят от примесей и различного рода дефектов. Так, стали, подвергавшиеся разной обработке и обладающие слегка отличными примесями, могут очень резко отличаться друг от друга. Поэтому поиски связи свойств материалов с их структурой представляют собой сложную и еще до сих пор окончательно не решенную задачу, а картины, описанные нами выше, претендуют лишь на то, чтобы дать первое представление об основных причинах в различии свойств тел.

ПУТЕШЕСТВИЕ В МИР ТЕМПЕРАТУР И ДАВЛЕНИЙ

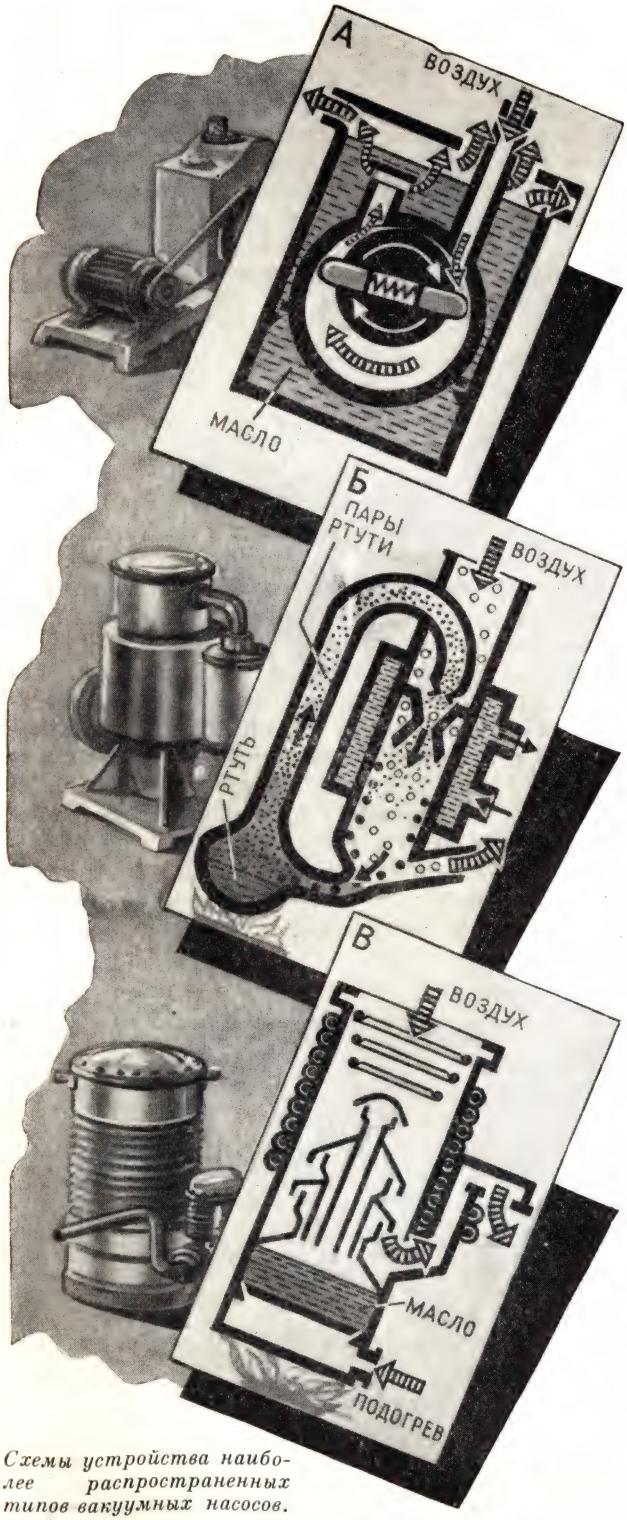
Огромные достижения в самых важных для людей областях науки и техники: электронике, ядерной физике, реактивном движении, космических полетах — самым тесным образом связаны с техникой очень низких и очень высоких температур и давлений.

ГЛУБОКИЙ ВАКУУМ

В распоряжении ученых и инженеров есть сейчас все необходимое для того, чтобы получать разрежения (вакуум) в газах, составляющие всего 1/1 000 000 000 000 (10^{-12}) долю обычного атмосферного давления. А современная электровакуумная, химическая и многие другие отрасли промышленности справедливо гордятся тем, что могут получать в больших объемах и длительно поддерживать разрежение, равное 10^{-7} *мм* ртутного столба. Такой вакуум необходим для осуществления целого ряда производственных процессов.

Однако даже самый лучший вакуум, созданный человеком, все еще далек от того, который можно наблюдать в природе. В межгалактических просторах Вселенной, вдали от скоплений газов и облаков космической пыли, на 15—16 $см^3$ пространства приходится всего только одна молекула вещества. В переводе на давления это соответствует примерно $2{,}5 \cdot 10^{-21}$ *атм*. По сравнению с этим даже слой ионизированных газов — ионосфера, находящаяся на

Знаменитый опыт с «магдебургскими полушариями».



Схемы устройства наиболее распространенных типов вакуумных насосов.

А — одноступенчатый ротационный (вращающийся) масляный насос. Б — ртутный (или масляный) пароструйный насос. В — трехступенчатый диффузионный масляный насос.

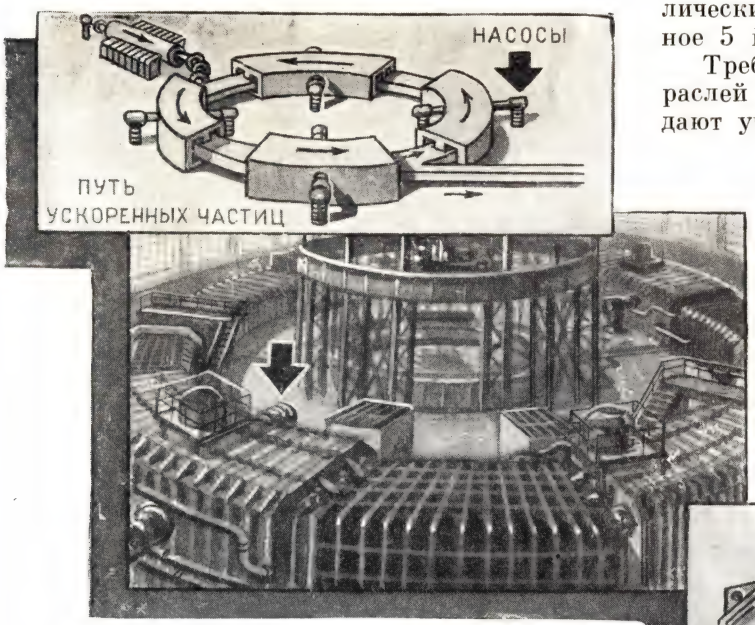
высоте примерно от 70 до 400 *км* над поверхностью Земли, чересчур «насыщена» молекулами: давление газа в ней составляет лишь 1/10 000 *атм*.

С вакуумом люди познакомились еще во времена Торричелли и Отто Герике. Отто Герике — бургомистр г. Магдебурга и ученый — наглядно доказал своим согражданам, что две упряжки из 12 лошадей не в силах разъединить две плотно прижатые друг к другу полусферы после того, как из них был откачан воздух. Так крепко эти полусферы удерживает вместе атмосферное давление.

Низкие давления долгое время оставались привилегией лабораторий — до тех пор, пока не были изобретены масляный и ртутный, а затем и диффузионный насосы. Они-то и проложили глубокому вакууму дорогу в промышленность. Их стали широко применять для откачивания воздуха из колб осветительных ламп, радиоламп, электронных приборов, люминесцентных, рентгеновских, телевизионных и других трубок, а также в ряде других приборов и производств. Первым техническим прибором, в котором применялся весьма глубокий вакуум, была обыкновенная электрическая лампочка. Генераторные и выпрямительные электронные лампы, используемые сейчас в радиотехнике, рентгеновские трубки и многие другие сложные приборы требуют самого глубокого («жесткого») вакуума — порядка 10^{-6}—10^{-8} *мм* ртутного столба. В усилительных (приемных) лампах используется более «мягкий» вакуум. Газонаполненные электроосветительные лампы, лампы дневного света и другие аналогичные приборы требуют вакуума от 0,1 до 20 *мм* ртутного столба. Даже обычный термометр — это довольно совершенный вакуумный прибор: его откачивают до 10^{-3} *мм* ртутного столба.

Особо высокие требования к вакууму предъявляет современная химическая промышленность. Вопрос «жизни и смерти» ряда новых отраслей химии зависит от того, можно или нет получать глубокий вакуум в сосудах и установках очень больших объемов. Без него невозможно было бы обойтись, например, при некоторых процессах перегонки, где применение высоких температур при обычных давлениях безнадежно разрушило бы получаемые продукты.

Современная ядерная физика также зависит от огромного количества вакуумных приборов и разнообразных вакуумных насосов. В сверхмощном советском синхрофазотроне вакуумная камера объемом в несколько тысяч кубо-



метров, внутри которой с огромной скоростью пролетают ядерные частицы, имеет давление меньше 1/1 000 000 000 *атм*. Вакуумные насосы откачивают здесь десятки тысяч литров газа в минуту.

ВЫШЕ АТМОСФЕРНОГО

Если мы обратимся к области давлений выше атмосферного, то среди повседневных наших «знакомых» одной из первых встретим автомобильную шину. Ее накачивают воздухом до давления в несколько атмосфер.

Современные паровые котлы, пожалуй, представляют собой верхний предел давлений, которые сейчас можно получать для промышленных целей на длительное время и в больших объемах. Обычно они работают при давлении 80—100 *атм*, а в самых последних конструкциях — до 250 *атм*.

Очень большие давления, но длящиеся весьма короткое время, люди научились получать давно. Это удары и взрывы. При выстреле из винтовки в ее стволе развивается давление порядка 3—5 тыс. *атм*. С огромными давлениями мы имеем дело всякий раз, когда прокалываем что-либо иглой или опускаем на граммофонную пластинку иглу патефона. Здесь давление достигает нескольких тысяч атмосфер на квадратный сантиметр. Используя энергию направленных взрывов, советские ученые совсем недавно при встречном ударе двух металлических пластин получили давление, равное 5 млн. *атм*.

Требования, выдвигаемые целым рядом отраслей современной науки и техники, побуждают ученых заниматься изысканием способов получения огромных давлений, длящихся продолжительное время. Так называемая порошковая металлургия требует длительных давлений в несколько тысяч атмосфер. В последние годы для научных исследований удалось сконструировать гидравлические устройства, развивающие давления свыше 400 тыс. *атм*,

Для того чтобы выкачать воздух из гигантской вакуумной камеры самого большого в мире советского синхрофазотрона, требуется работа большого числа вакуумных насосов огромной мощности.

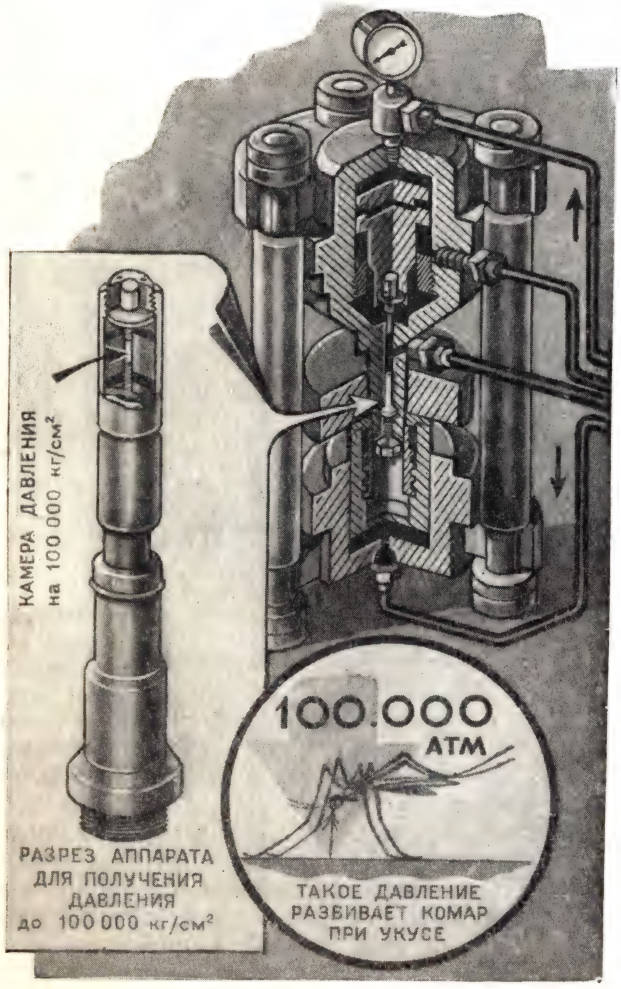
правда, в крошечной рабочей камере. Это сразу открыло массу интереснейших возможностей, которые раньше даже трудно было представить.

Расскажем лишь о немногих из них. Известно, что при резком охлаждении газы превращаются в жидкости, которые, однако, обладают очень малой плотностью и, следовательно, чрезвычайно легки. При давлениях же в несколько тысяч атмосфер плотность их становится равной плотности обычных жидкостей.

Интересно, что при столь больших давлениях цилиндры аппаратов из некоторых сортов металлов вдруг начинают «потеть»: через поры в их толстых стенках просачиваются капельки жидкости, передающей давление компрессора.

Твердые тела поддаются сжатию еще труднее, чем жидкости. При этом происходит ряд любопытных явлений. Желтый фосфор превращается в черный и остается таким после снятия давления. Некоторые вещества, например бумага, становятся прозрачными. При давлении порядка 100 тыс. *атм* и температуре выше 2300°С из обыкновенного графита удалось получить алмазы, правда, пока еще очень мелкие.

Мы бы очень удивились, если бы нам сказали, что можно получить мрамор, имеющий пластичность стали, а самую прочную сталь сделать в 2—3 раза еще более прочной на разрыв. Однако все это осуществляется при давлениях порядка 25—30 тыс. *атм*.



Крошечный хоботок комара оказывает на поверхность кожи давление, равное десяткам тонн на один квадратный сантиметр! Чтобы получать такие же сверхвысокие давления для научно-исследовательских и промышленных целей (например, для получения искусственных алмазов), ученым приходится создавать очень сложные и громоздкие установки.

Если воду, подвергнутую столь высокому давлению, выпустить из аппарата тонкой струей, то она будет резать металл, как масло, и пробивать в нем отверстия. А струей воды, выбрасываемой под давлением всего лишь в несколько десятков атмосфер, можно дробить угольный пласт. В последнее время этот способ начинают применять при добыче угля.

Ученые придают огромное значение тому, что физические свойства твердых тел можно менять при помощи сверхвысоких давлений. В частности, при сильных сжатиях можно получить намагничение ферромагнетика.

Взрыв атомной бомбы — самый мощный источник сверхвысоких давлений из имеющихся в распоряжении человека (порядка 1000 млрд. *атм*). Это — единственное исключение, когда человеку, правда, на очень короткий промежуток времени (менее одной миллионной доли секунды), наконец, удалось создать на Земле условия, которые в природе встречаются лишь в недрах самых горячих и плотных звезд.

За исключением немногих особых случаев, высокие давления в природе, как правило, являются следствием высоких температур, а высокие температуры — следствием высоких давлений.

ОГОНЬ

Одним из величайших открытий человека было открытие способа добывания огня — первый шаг в использовании теплоты. Огонь обеспечил человека теплом, освободил его от самых примитивных форм борьбы за существование.

Позднее огонь дал возможность человеку выплавлять металлы, помог ему добывать и использовать природное топливо, превращая теплоту сначала в механическую, а затем и в другие виды энергии. Использование огня помогло развитию мышления человека, рождению научной мысли, культуры и искусства. А применение теплоты положило начало техническому прогрессу, ликвидации зависимости человечества от одной только мускульной энергии людей и животных.

Что же такое г о р е н и е? Это—химическая реакция окисления, которая сопровождается выделением теплоты и может проходить почти с любой скоростью и при любой температуре. Горение даже не всегда требует присутствия кислорода. Ведь некоторые металлы могут сгорать в атмосфере азота.

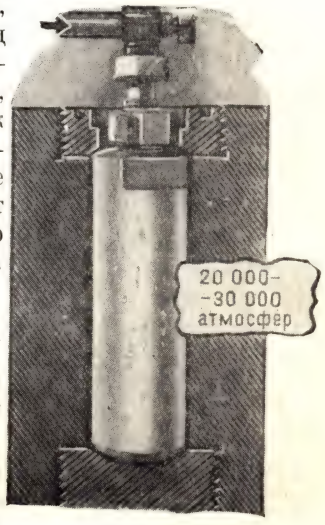
Самым трудным в технике является получение высоких давлений в больших объемах. Ученым удалось получить давления порядка 200—300 тысяч атмосфер (в объемах меньше 1 см³), но огромный пресс-молот, обжимающий раскаленную болванку стали, развивает давление лишь порядка нескольких тысяч атмосфер.

Если горение сопровождается выделением газов, то образуется пламя. Яркость его свечения зависит от количества находящихся в нем твердых частиц. Зародившись в среде, в которой происходит химическая реакция горения, пламя нарастает и поддерживает само себя при помощи теплоты, которую оно же само и развивает. В свою очередь выделение теплоты повышает температуру горения, а последняя повышает скорость реакции. Так продолжается до тех пор, пока количество образующейся теплоты не уравняется с количеством теплоты, отдаваемой окружающей среде. Но теплота не всегда единственная или даже главная причина, вызывающая горение или взрыв. Другая причина — химический процесс, известный как неразветвленная или разветвленная цепная реакция.

Типичный для горения процесс — это сгорание бензина в двигателе внутреннего сгорания. Здесь топливо, распыленное и смешанное с воздухом, сжимается и поджигается электрической искрой сначала в небольшом объеме газовой смеси. По мере сгорания теплота последовательно распространяется на прилегающие объемы холодной смеси. Таким путем образуется зона распространяющегося во все стороны интенсивного горения, называемая волной горения.

Если горючая смесь подводится к зоне горения непрерывно, то волна горения при благоприятных условиях может распространяться и против течения со скоростью, равной скорости поступления горючей смеси. Примером такого горения может служить устойчивое пламя в горелке газовой кухонной плиты. Скорость распространения волны горения называется скоростью горения.

Волна горения, сопровождающаяся расширением заключенного внутри нее газа, производит работу, которая вызывает резкое повышение давления в еще не горящих слоях газа, расположенных перед фронтом волны. В быстрогорящей смеси, распространяющейся к тому же еще и по узкому каналу, движение волны горения может принять характер ударной волны.



При очень высоких давлениях, развиваемых современными лабораторными установками, применяемое в них масло может просочиться даже через очень толстые стенки стальных цилиндров. Последние начинают как бы «потеть».

Самый мощный источник давления, созданный человеком,— атомный взрыв, развивающий миллион миллионов атмосфер, длится всего миллионные доли секунды.

Такие волны распространяются с очень большой скоростью. У сильных взрывчатых веществ, например у тола или нитроглицерина, давление фронта ударной волны может достичь 100—200 тыс. *атм*.

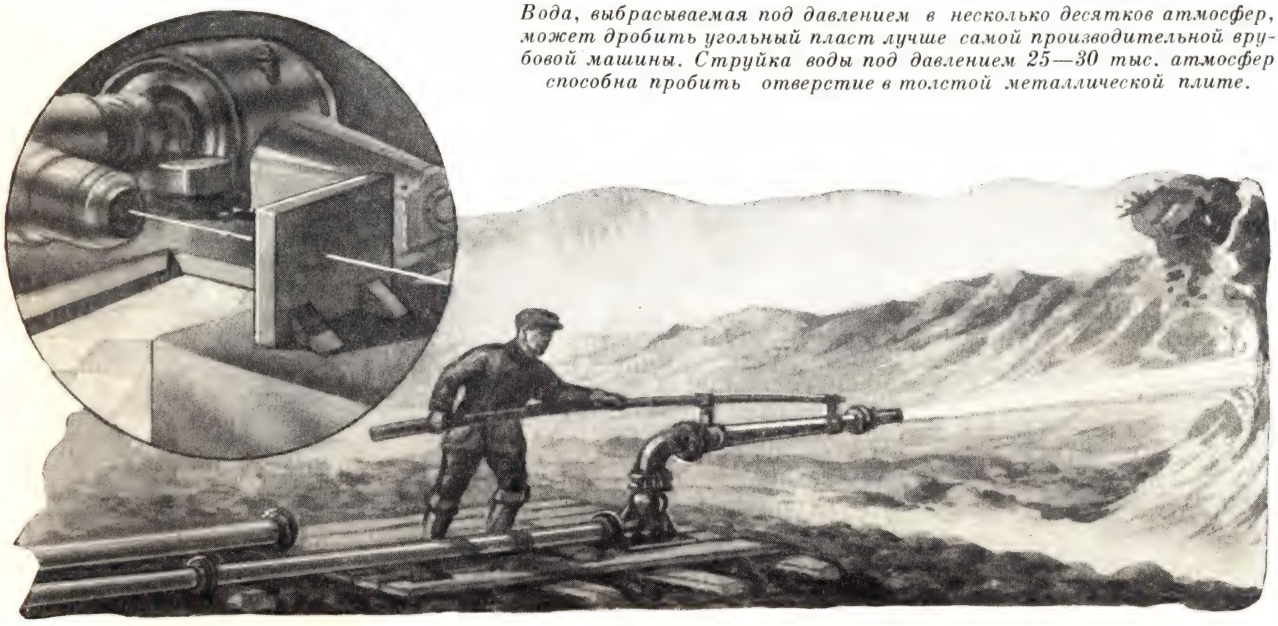
ТЕПЛОТА И ЖИЗНЬ

Мы можем двинуться в путешествие по шкале температур и давлений в любую сторону: направиться, например, в область низких и сверхнизких температур. Здесь, в точке, отстоящей «всего лишь» на 273,16°С от привычного для нас нуля (0°С), находится, как считают физики, наинизший предел температуры — абсолютный нуль. Можем направиться и в противоположном направлении — в сторону любых высоких и самых высоких температур. Путешествие в эту сторону могло бы продолжаться бесконечно. Здесь предела даже теоретически не видно.

Между этими крайностями бесконечно огромной природной шкалы температур затерялся крошечный отрезочек, протяженностью всего в 150—200°. В этих пределах может существовать биологическая жизнь, на вершине развития которой находится человек.

Поэтому, прежде чем предпринять такое путешествие, задержимся немного на этом «пятачке» — скромном участке температур, скупо отведенном нам природой для жизни. Все огромное многообразие живой природы уместилось здесь буквально на «острие ножа» — в пределах от 0 до 50° С. Лишь очень немногие организмы могут сколько-нибудь длительно существовать при температурах ниже или выше этих пределов.

Вода, выбрасываемая под давлением в несколько десятков атмосфер, может дробить угольный пласт лучше самой производительной врубовой машины. Струйка воды под давлением 25—30 тыс. атмосфер способна пробить отверстие в толстой металлической плите.



Есть, однако, несколько примечательных исключений. Например, на Аляске существует насекомое веснянка, которое вполне нормально размножается при температуре 0°С. Известны разновидности бактерий, которых можно многократно замораживать до температуры порядка — 150°С и держать в таком состоянии месяцами. После размораживания они оживают, как будто бы с ними ничего особенного и не произошло. Целая группа бактерий и растений (например, светящиеся бактерии, споры мха, семена некоторых злаков) выживает даже после пребывания при температуре — 268°С.

Такие эксперименты, конечно, нельзя производить над высшими организмами. Однако хорошо известно, что у животных, проводящих зиму в спячке, температура тела резко понижается, а жизнедеятельность организма и обмен сильно замедляются. Так, молодые белые мыши оживали после охлаждения до — 2,78°С, после того, как все видимые признаки жизни у них, включая биение сердца, исчезали.

В последние годы врачи-хирурги осмелились подвергнуть глубокому охлаждению и организм самого человека в тех случаях, когда ему угрожает гибель от других, более опасных причин.

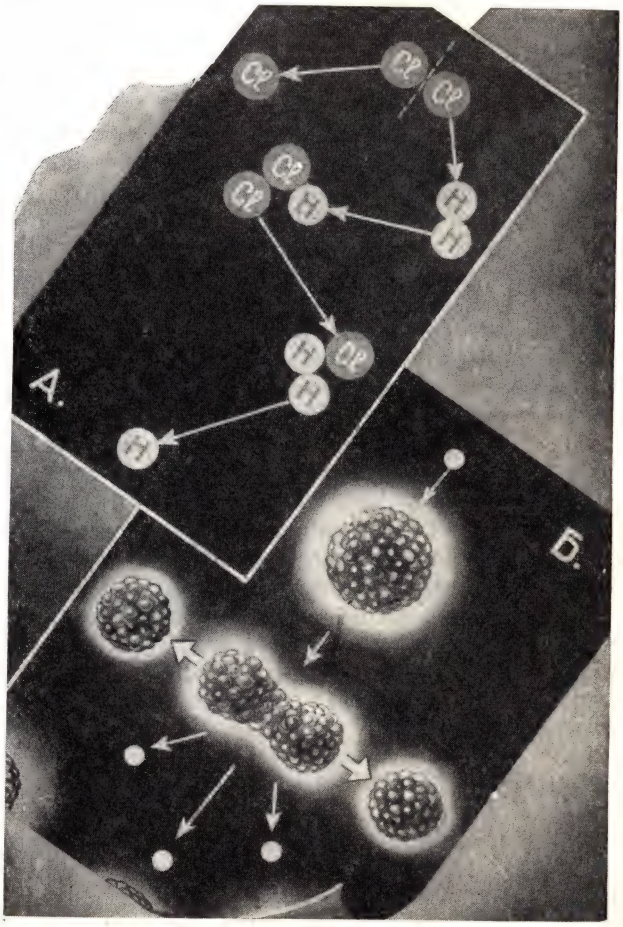
Известно, что в ряде случаев врачам удавалось оживить человека и после так называемой клинической смерти, но с одной оговоркой: если промежуток времени после нее не превышает нескольких минут. Почему же столь коротка ниточка, отделяющая жизнь от смерти? Дело оказалось очень сложным. Тончайшие клетки головного мозга животного и человека необратимо гибнут уже спустя несколько минут после прекращения притока кислорода, переносимого током крови.

И тут на помощь врачам пришел холод. Раз при понижении температуры тела животного все его жизненные процессы и обмен замедляются, то и потребление кислорода клетками мозга при этом должно столь же резко сократиться, не приводя к их неизбежной гибели. Пока первые смелые опыты дали многообещающие результаты. Усыпленный, а затем и охлажденный до температуры 25—27°С человек возвращался к нормальной жизни даже спустя 20—25 минут после полного прекращения кровообращения — время в ряде случаев достаточное для спасения его жизни. И это лишь первые шаги в новой области медицины — гипотермии!

В действии тепла на живые организмы проявляются известные противоречия. В умеренной степени тепло повышает и ускоряет жизненные процессы, оказывая благотворное влияние на рост и размножение организмов. Но, когда температура превышает эти не столь уж отдаленные пределы, жизнь оказывается куда более уязвимой. Однако и здесь есть исключения.

У белых мышей температура тела равна 39°С, а у некоторых певчих птиц—даже 45°С. Из всех животных наиболее теплостойка порода рыб, живущая в горячих ключах острова Цейлона. Они имеют температуру около 50°С. Самые же «горячие» организмы можно найти в мире бактерий и растений. Некоторые формы таких организмов нормально существуют при температуре 70°С и выше. А многих удается убить только при длительном кипячении.

В горячих источниках можно найти сине-зеленую водоросль, которая выживает при 85°С,



Два вида цепных реакций: А — химическая, Б — ядерная.

а бактерии, живущие в глубоких нефтяных слоях, ведут «кипучую» жизнь при температурах даже выше 100°С.

Здесь, естественно, следует различать температуру, свойственную длительной жизнедеятельности организма, и временную температуру, которую тот или иной организм может перенести при некоторых условиях. Речь также не идет о тех средствах, к каким прибегает человек в борьбе с крайне низкой и высокой температурой (одежда, жилище, отопление, охлаждение и т. п.).

Известный полярный исследователь Нансен не раз говорил, что человек может привыкнуть к любым тяготам жизни, но только не к холоду. Жару человек переносит значительно легче.

В ряде случаев это может показаться даже неправдоподобным. Одно время на Западе был в ходу следующий цирковой аттракцион, возбуждавший интерес не только у зрителей. Человека помещали в жарко натопленную печь с куском мяса. Спустя некоторое время он выходил невредимым, держа в руках зажаренное мясо. В 1828 г. некто Гудини в Лондоне в присутствии ученых выдерживал в печи температуру в 102°С. В 1867 г. другой человек, Чаберт, осуществлял этот опыт уже при температуре в 193°С. Когда он дышал на термометр, ртуть в последнем понижалась! При ощупывании тело его казалось холодным как лед. В то же самое время прикасаться к металлическим предметам внутри печи было опасно — можно было получить тяжелый ожог.

Секрет такой «жаростойкости» человека заключался в том, что, как правило, в печь он входил одетым в толстую шерстяную одежду, обеспечивавшую быстрое появление обильного пота. Испаряясь, пот надежно предохранял организм от гибельного перегрева при столь высокой температуре. При температуре же до 130°С можно было обойтись и без такой одежды. По последним данным, человек в легкой одежде может выдержать температуру до 200°С, а в плотной одежде даже до 260°С.

НА ПОДСТУПАХ К АБСОЛЮТНОМУ НУЛЮ

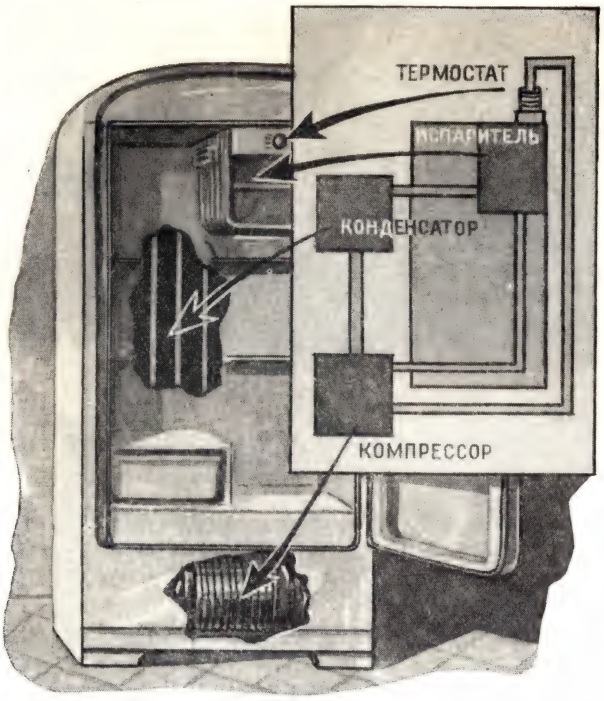
Путешествие в область очень низких температур—к абсолютному нулю поначалу не предвещает никаких особых неожиданностей или тайн. Температуры примерно до минус 40—60°С практически целиком отданы технике холодильного дела. Она обеспечивает людей свежей, здоровой пищей, очищенным, охлажденным и увлажненным воздухом, сохраняет высокую стерильность медицинских препаратов и лекарств. Далее идут области, при которых все вещества, жидкие при обычных температурах, становятся твердыми, а газообразные — жидкими. И, наконец, область, в которой превратившиеся в жидкость газы можно охладить уже до твердого состояния. При температуре —39°С замерзает в термометрах ртуть, при —78,5°С углекислота (CO_2) превращается в дымящееся вещество — сухой лед, и, наконец, при —114,2°С замерзает спирт.

Здесь обычно переходят на иную шкалу измерения температур. В повседневной жизни мы настолько привыкли считать 0°С точкой замерзания воды, а 100°С точкой ее кипения, что всякая температура ниже нуля нам кажется «холодом», в то время как в действительности и 10 и 100°С ниже точки замерзания воды все еще «тепло», так как впереди еще много встретится точек замерзания различных других жидкостей. Поэтому отсчет температур мы будем вести от абсолютного нуля. Его обозначают 0°К (градусы Кельвина), в отличие от градусов Цельсия.

В этом случае наш привычный 0°С будет равняться +273,16°К.

Техническое применение низких температур стало возможным главным образом после изобретения промышленных способов получения сжиженных газов: воздуха, азота, кислорода, водорода и гелия. Причем здесь есть два главных пути: первый — получение благодаря сжи-

Не столь уж холодные продукты — мороженое, замороженные фрукты — замораживаются при помощи «сухого льда» — углекислоты, охлажденной до—79°С.



Так устроен наиболее простой аппарат для получения сравнительно небольших низких температур — комнатный холодильник (до —5°С).

жению газов низких температур, второй—научное и промышленное использование самих сжиженных газов или охлажденных веществ.

Каким образом удалось привести в жидкое состояние воздух? Ведь в нашем повседневном представлении, чтобы охладить какое-либо вещество, необходимо поместить его в среду с еще более низкой температурой, например поставить на лед или в холодильник. В специальных установках — машинах холода — это делается несколько иначе.

Давно было известно, что при быстром сжатии газ нагревается. На это, естественно, расходуется некоторое количество энергии. А теперь попробуем такой сжатый и нагревшийся газ охладить до комнатной температуры, а затем дать ему возможность расшириться, выполняя при этом какую-нибудь работу, например вращая турбину или приводя в движение поршень. Эта работа может осуществиться только за счет энергии теплового движения. В результате температура газа понизится. Часть охлажденного таким образом газа можно в свою очередь обратить на охлаждение оставшейся порции сжимаемого еще раз газа. Последний, снова расширяясь при совершении работы, создаст еще более низкую температуру, и т. д.—до тех пор, пока последняя порция газа не охладится до жидкого состояния. Превращенный в жидкость воздух, оказавшись под обычным атмосферным давлением, кипит при температуре около 81° К (—192°С).

Чтобы получить еще более низкие температуры, используют другой метод. Альпинистам хорошо известно, что чем ниже давление, тем скорее закипает жидкость. То же самое происходит и с жидким воздухом: при пониженном (против атмосферного) давлении он закипает уже не при 81°К, а при 75—70°К и даже ниже. Схема холодильной установки, основанной на этом принципе, выглядит примерно так.

Жидкий воздух помещается в «дьюаре» — стеклянном сосуде, имеющем двойные стенки. Его назвали так по имени изобретателя — французского физика Дьюара. Из пространства между стенками откачан воздух, а внутренние поверхности их посеребрены, благодаря чему сведен до минимума доступ теплоты снаружи. Сосуд заполнен жидким воздухом и герметически закрыт крышкой, через которую одна трубка ведет к вакуумному насосу, а другая — к пробирке, погруженной в жидкий воздух. Если интенсивно откачивать содержимое дьюара, то давление уже испарившегося жидкого воздуха в нем постепенно понижается, вследствие чего жидкий воздух начинает кипеть при все более и более низкой температуре. А раз так, то любой газ, поступающий снаружи в погруженную в жидкий воздух пробирку, охлаждается уже ниже той температуры, при которой кипит жидкий воздух при нормальном атмосферном давлении.

Если вместо жидкого воздуха взять жидкий кислород, кипящий при температуре 90,16°К (—183°С), то можно понизить температуру внутри пробирки еще больше и превратить в жидкость водород, температура кипения которого 20,36°К (—252,8°С). Откачивая пары жидкого водорода при температуре —259,2°С (13,96°К), удалось получить твердый водород.

Аналогично можно превратить в жидкость и газообразный гелий при температуре—268,9°С (4,26°К). В установках другого рода при давлении больше 25 *атм* можно получить твердый гелий, температура которого достигает—271,9°С или 1,26°К. И тем не менее до абсолютного нуля остается столь бесконечно далеко, что ученые давно пришли к выводу о практической недостижимости этой температурной точки.

Для получения температур ниже 0,7°К жидкий гелий уже не пригоден. Пришлось еще

Схема получения жидкого воздуха, применяемая в промышленных установках.

раз изменить методику и прибегнуть к так называемому методу адиабатического размагничивания. При намагничивании некоторых парамагнитных солей (например, железоаммониевых или хромокалиевых квасцов), предварительно охлажденных до очень низкой температуры (0,7°К), выделяется значительное количество теплоты. Если отвести выделившуюся теплоту, а затем размагнитить соль, то температура ее резко падает до величины, отстоящей всего на несколько стотысячных долей градуса от абсолютного нуля. Механизм этого явления приближенно можно объяснить тем, что часть энергии теплового движения связана с вращением атомов парамагнитной соли, представляющих собой как бы сверхмикроскопические магнитики, а часть энергии — с тепловыми колебаниями этих атомов в кристаллической решетке соли. При намагничивании соли сильным внешним магнитным полем происходит как бы насильственное перемагничивание вращающихся атомов-магнитиков, устанавливающихся вдоль линий этого внешнего поля. А это резко тормозит их тепловое движение. Выделяющаяся при этом теплота отводится из соли охлаждающей средой. Когда же внешнее магнитное поле исчезает, атомы-магнитики вновь приобретают свободу движения, черпая необходимую для этого энергию в энергии колебательного движения атомов кристаллической решетки. Значительное уменьшение размаха колебаний атомов решетки и проявляется в резком понижении температуры соли.

Трудно перечислить все технические и научные области применения низких температур, создаваемых при помощи жидкого воздуха, азота, кислорода, водорода и гелия. И в первую очередь области применения самих этих сжиженных газов. Жидкий воздух, например,— сильное взрывчатое вещество, жидкий азот — хорошее сырье для производства искусственных удобрений. Жидкий кислород — очень активный окислитель многочисленных видов топлива. Жидкий водород и гелий широко применяются для научных исследований, начиная с измерения температур сверхудаленных звезд и галактик в особо чувствительных приборах — болометрах — и кончая ядерными исследованиями в «пузырьковых» камерах для обнаружения элементарных частиц (см. стр. 530).

Однако самый большой интерес представляют исследования в области так называемой сверхпроводимости. Суть ее заключается в том, что при температурах, отстоящих всего на несколько градусов от абсолютного нуля, в ряде веществ сопротивление прохождению через них электрического тока внезапно полностью исчезает.

Значение этого явления для техники очень велико. Огромное количество энергии бесполезно пропадает везде и всюду, где применяется электрический ток, начиная от карманного фонарика и кончая мощными электрическими двигателями. Значительная часть энергии, направляемой Куйбышевской гидроэлектрической станцией в Москву, расходуется на преодоле-

ние электрического сопротивления проводов почти тысячекилометровой линии передач. И любые усилия ученых и инженеров не дают существенного снижения этих неизбежных потерь.

Теперь представьте себе, что электрическое сопротивление проводов, машин, линий передач вдруг исчезло. Это означало бы увеличение на 20—30% всех энергетических ресурсов человечества, многомиллиардную экономию материальных средств — цель, явно стóящая любых затрат на опыты и эксперименты.

Конечно, до изготовления многокилометрового кабеля, заполненного сверхпроводящим жидким водородом или гелием и соединяющего, допустим, мощную электростанцию с Москвой, пока еще очень далеко. Однако целый ряд лабораторных устройств и приборов, изготовленных из сверхпроводящих веществ, погруженных в жидкие газы, используется уже сейчас. Делаются, например, попытки применить такие приборы для особо чувствительных электрических измерений в коротких отрезках кабелей между антенной и усилительным устройством радиотелескопа или между передатчиком и антенной мощной радиолокационной станции. Резкое уменьшение электрического сопротивления этих цепей в огромное число раз увеличивает чувствительность всех таких установок.

А теперь из царства абсолютного нуля возвратимся к привычному нулю по шкале Цельсия и отправимся в более длительное путешествие — в область положительных температур.

КАК УДЕРЖАТЬ ТЕПЛОТУ

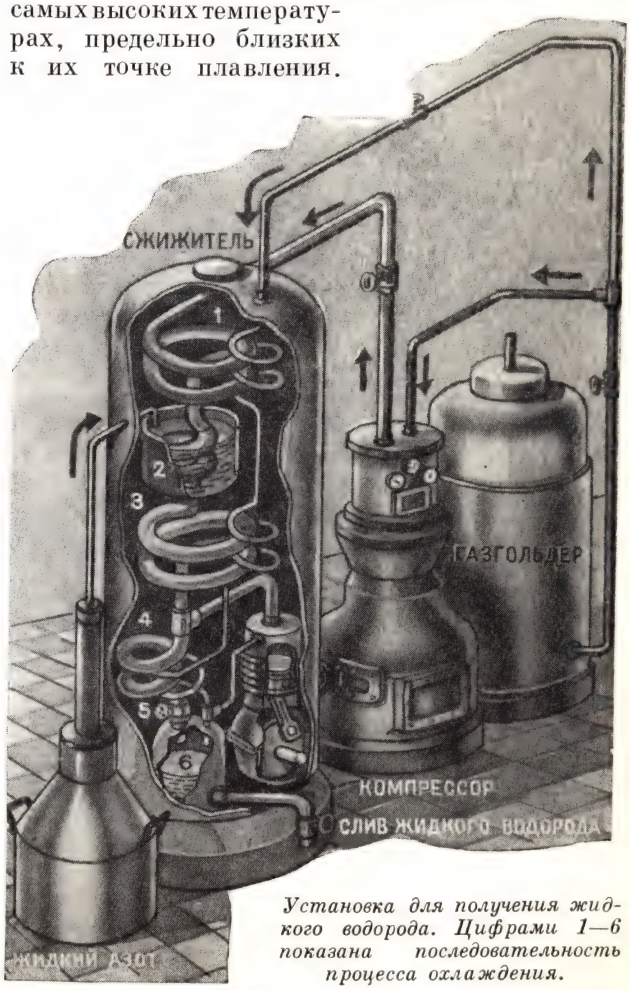
В распоряжении ученых и инженеров есть целый ряд способов получения высоких и даже сверхвысоких температур. Но главное препятствие для широкого использования теплоты в науке и технике до сих пор заключается в проблеме получения материалов, способных удерживать эту теплоту.

Коэффициент полезного действия тепловых машин, преобразующих теплоту в энергию механического движения, увеличивается лишь с увеличением разности температур между нагревателем и холодильником [1]. Во многом он ограничивается жаростойкостью материалов, в которые нужно заключать носитель теплоты — горящий газ или нагретую жидкость.

Какие температуры должны выдерживать эти материалы? Здесь слова «высокие температуры» имеют разное значение. Для конструктора паровой турбины это будет 650—700°С, для конструктора газовой турбины —1000—1200°С, для конструктора ракет—1200—2000°С и выше.

Значит, прежде всего они должны иметь предельно высокую точку плавления. Однако из всех элементов, входящих в периодическую таблицу Менделеева, лишь какие-нибудь два десятка имеют точку плавления выше 1600°С. Температура плавления — это свойство того или иного вещества, которое мы не в состоянии изменять ни механической обработкой, ни иным физическим воздействием. К счастью, можно создавать сплавы и химические соединения, имеющие значительно более высокие точки плавления, чем входящие в них вещества, взятые порознь.

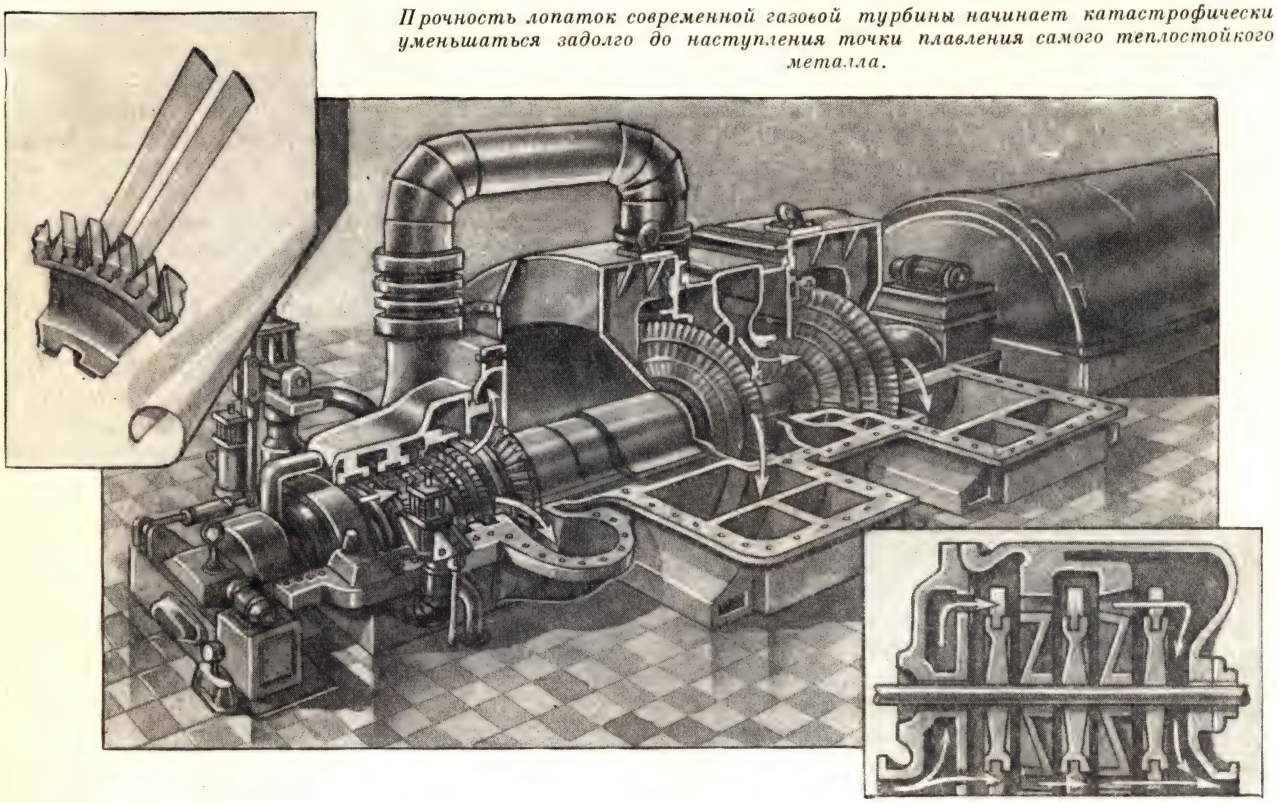
Разумеется, эти материалы должны сохранять требуемую механическую прочность при самых высоких температурах, предельно близких к их точке плавления.



Установка для получения жидкого водорода. Цифрами 1—6 показана последовательность процесса охлаждения.

[1] Подробнее об этом см. в ст. «Физические принципы работы тепловых машин».

Прочность лопаток современной газовой турбины начинает катастрофически уменьшаться задолго до наступления точки плавления самого теплостойкого металла.



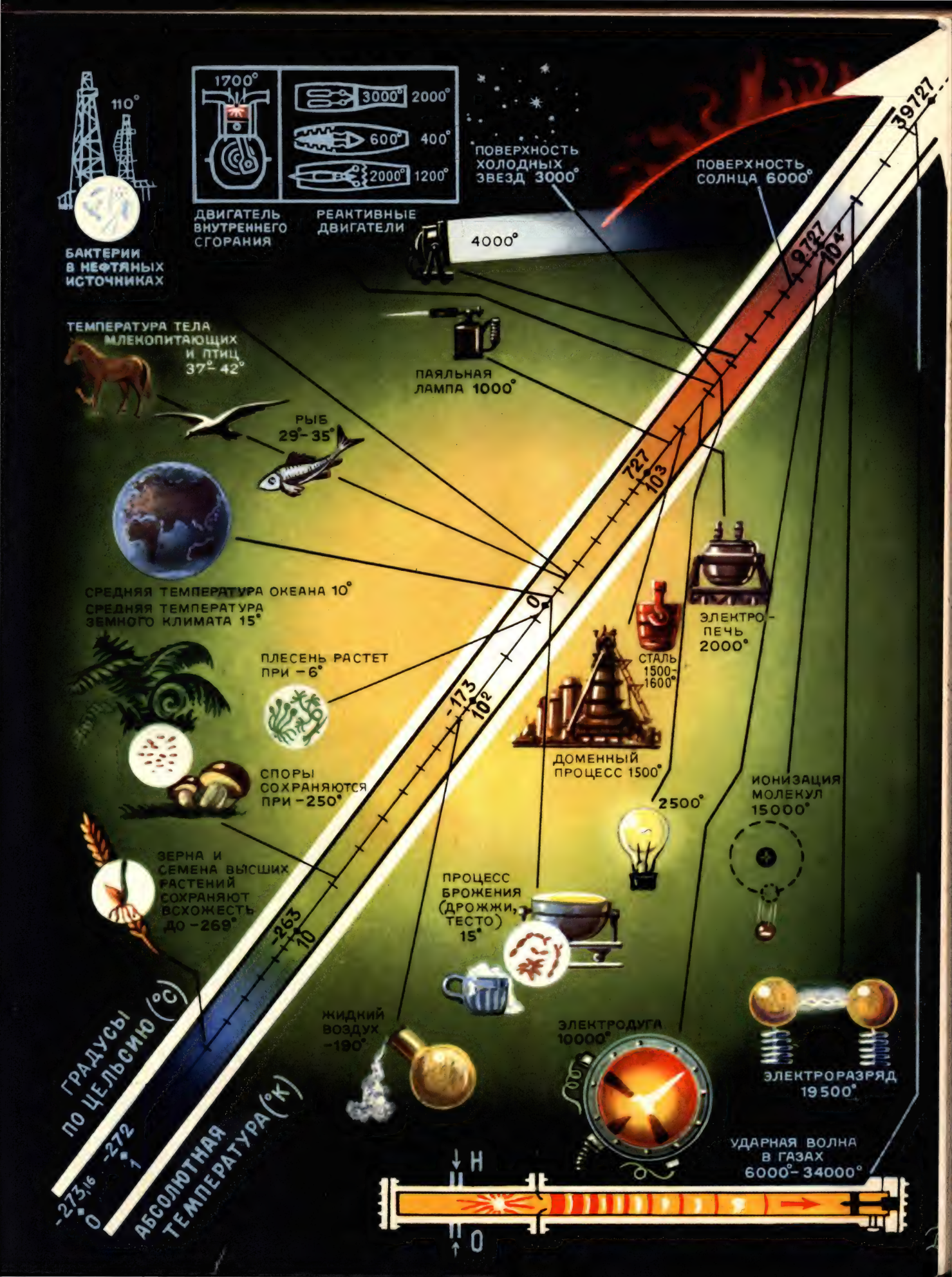
Но в подавляющем большинстве случаев прочность начинает уменьшаться уже при комнатной температуре, сначала медленно, а затем, с ростом температуры, все быстрее и быстрее. Например, прочность лопаток ротора турбореактивного авиационного двигателя, делающих более 15 тыс. *об/мин* и изготовленных из самой жаропрочной стали, катастрофически приближается к опасному пределу прочности уже при температуре 600°С. А ведь при очень высоких температурах такие материалы должны быть еще и химически инертными, т. е. не вступать ни в какие химические реакции с жидкостью или газом, с которыми они соприкасаются во время работы.

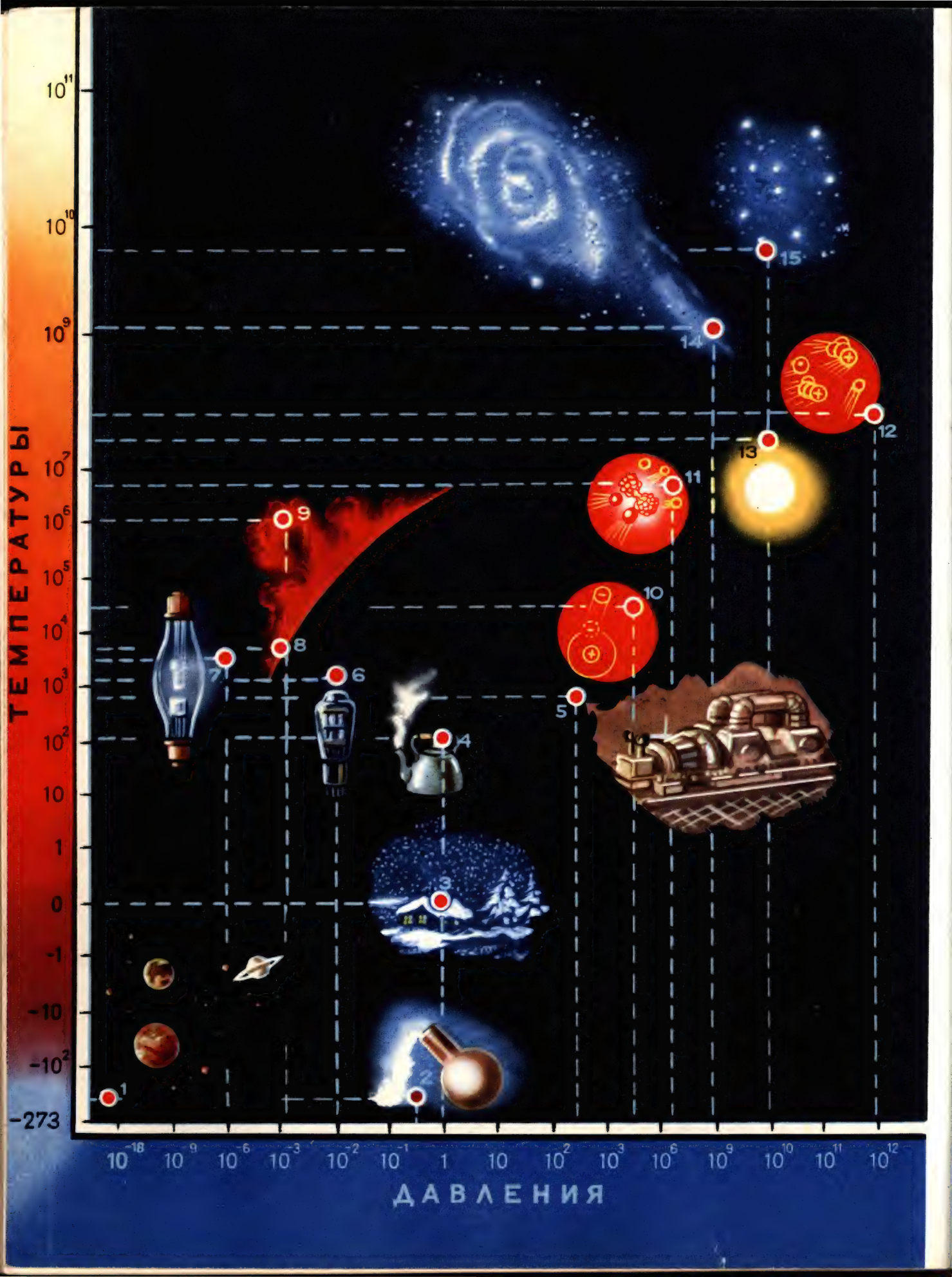
В этих условиях сразу же отпадают такие металлы, как алюминий, магний, цинк, свинец и сплавы из них. Ведь у них очень низкие точки плавления. Сравнительно высокими температурами плавления обладают титан, никель, марганец, хром и кобальт. Небольшие примеси этих элементов позволяют получать стали с хорошими физическими свойствами при высоких температурах.

Поэтому ученые-металлурги непрерывно стремятся создавать новые, обладающие все большей и большей жаропрочностью сплавы для тепловых и реактивных двигателей. Но, как только они создадут более жаропрочную марку стали, инженеры в своих конструкциях тотчас же поднимают рабочую температуру и давление пара или газа и опять требуют еще более жаростойких сплавов.

Выдающиеся успехи в этой области металлургии были достигнуты после того, как основой современной скоростной авиации стал реактивный двигатель. Меньше чем за десять лет рабочие температуры в газовой турбине воз-

Таблица 19. Температуры в градусах Цельсия (°С) и абсолютной шкалы (°К), при которых могут существовать живые организмы и происходят физические явления, создаваемые человеком или существующие в природе.


110°
БАКТЕРИИ В НЕФТЯНЫХ ИСТОЧНИКАХ
1700°
ДВИГАТЕЛЬ ВНУТРЕННЕГО СГОРАНИЯ
3000°
2000°
600°
400°
2000°
1200°
РЕАКТИВНЫЕ ДВИГАТЕЛИ
ПОВЕРХНОСТЬ ХОЛОДНЫХ ЗВЕЗД 3000°
ПОВЕРХНОСТЬ СОЛНЦА 6000°
4000°
39727
9727
10⁴
ТЕМПЕРАТУРА ТЕЛА МЛЕКОПИТАЮЩИХ И ПТИЦ 37°-42°
ПАЯЛЬНАЯ ЛАМПА 1000°
РЫБ 29°-35°
727
10³
СРЕДНЯЯ ТЕМПЕРАТУРА ОКЕАНА 10°
СРЕДНЯЯ ТЕМПЕРАТУРА ЗЕМНОГО КЛИМАТА 15°
0
ЭЛЕКТРО-ПЕЧЬ 2000°
СТАЛЬ 1500-1600°
ПЛЕСЕНЬ РАСТЕТ ПРИ −6°
-173
10²
ДОМЕННЫЙ ПРОЦЕСС 1500°
СПОРЫ СОХРАНЯЮТСЯ ПРИ −250°
2500°
ИОНИЗАЦИЯ МОЛЕКУЛ 15000°
ЗЕРНА И СЕМЕНА ВЫСШИХ РАСТЕНИЙ СОХРАНЯЮТ ВСХОЖЕСТЬ ДО −269°
ПРОЦЕСС БРОЖЕНИЯ (ДРОЖЖИ, ТЕСТО) 15°
-263
10
ГРАДУСЫ ПО ЦЕЛЬСИЮ (°C)
ЖИДКИЙ ВОЗДУХ −190°
ЭЛЕКТРОДУГА 10000°
ЭЛЕКТРОРАЗРЯД 19500°
-272
1
-273,16
0
АБСОЛЮТНАЯ ТЕМПЕРАТУРА (°K)
УДАРНАЯ ВОЛНА В ГАЗАХ 6000°-34000°
H
O


ТЕМПЕРАТУРЫ
10^{11}
10^{10}
10^{9}
10^{7}
10^{6}
10^{5}
10^{4}
10^{3}
10^{2}
10
1
0
-1
-10
-10^{2}
-273
10^{-18} 10^{-9} 10^{-6} 10^{-3} 10^{-2} 10^{-1} 1 10 10^{2} 10^{3} 10^{6} 10^{9} 10^{10} 10^{11} 10^{12}
ДАВЛЕНИЯ
1
2
3
4
5
6
7
8
9
10
11
12
13
14
15

росли с 650 до 900° С и выше. Дальнейшее увеличение рабочих температур газовых турбин было уже относительно медленным. Видимо, для всех таких сплавов предел рабочих температур лежит где-то в области 980—1000° С.

Поэтому на смену металлическим сплавам пришли керамические — неметаллические — материалы. Они представляют собой соединения металлов с другими веществами — кислородом (оксиды), углеродом (карбиды), азотом (нитриды), бором (бориды) и т. д.

Основное достоинство этих материалов — весьма высокая температура плавления.

Керамические оксидные материалы полностью свободны от опасности окисления, присущей почти всем металлам. Но зато они очень хрупки и весьма чувствительны к резким изменениям температуры. Керамические же карбиды, нитриды и бориды обладают сравнительно хорошими металлическими свойствами, однако склонны к окислению. И здесь, видимо, предстоит найти некий компромисс между высокой механической прочностью и недостаточной химической инертностью этих материалов в сильно окисляющей атмосфере.

Этот компромисс сейчас осуществляется в так называемых металлокерамических материалах (керметы), изготовляемых из смеси керамических и чисто металлических порошков. Однако удачно сконструировать машины из таких материалов, безусловно, чрезвычайно трудно. Выход здесь заключается вот в чем.

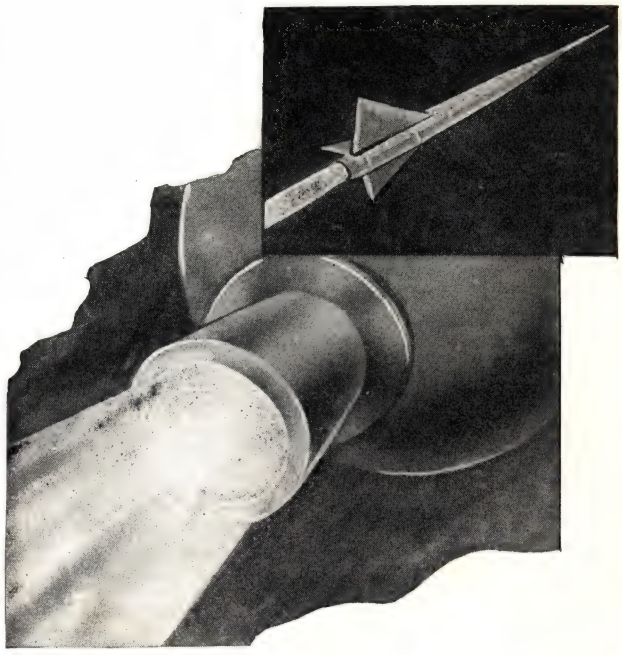
Известно, что сильно нагреваемые материалы, если их достаточно энергично охлаждать, будут иметь весьма умеренную температуру. Например, медные форсунки, через которые в доменную печь подается предварительно подогретый воздух, охлаждаются водой. Благодаря этому они не расплавляются, даже находясь в самой горячей зоне домны. В ракетных двигателях камеры сгорания и форсунки, сделанные даже из простой углеродистой стали, можно успешно охлаждать или жидким горючим, или окислителем, который циркулирует вокруг камеры.

В последнее время начинает находить применение способ охлаждения «выпотеванием». Охлаждающие жидкость или газ под очень большим давлением нагнетают в «рубашку», окружающую камеру. Просачиваясь сквозь ее пористые стенки, они создают на соприкасающейся с пламенем поверхности тонкую пленку, которая, непрерывно испаряясь, охлаждает стенки камеры.

Принудительное охлаждение, несомненно, усложняет конструирование и производство двигателей. Однако это пока наиболее обнадеживающий путь для достижения в реактивном двигателе нужных рабочих температур, доходящих до 2000—3000°С.

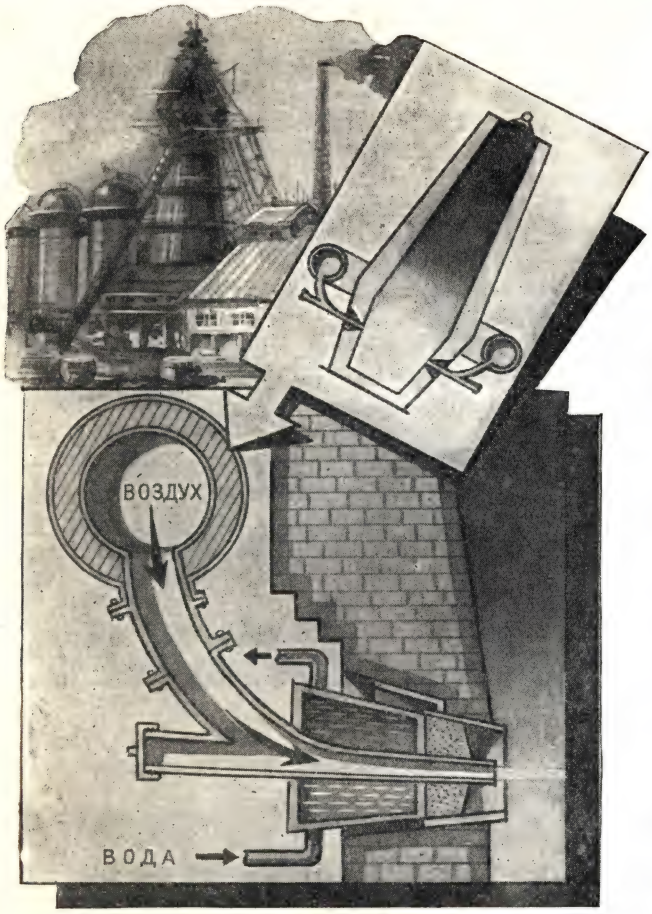
А ведь возможности резкого увеличения скорости полета лежат в применении новых видов топлива. В лабораторных условиях сейчас удалось получить температуру горения выше 3000° С. А смесь фтора и водорода позволяет получать еще более высокие температуры — до 4500° С. Однако фтор — сильно корозирующее и ядовитое вещество. Это очень затрудняет его сколько-нибудь широкое применение. И все же эта смесь наиболее перспективна для космических полетов.

Для увеличения количества теплоты примерно на 20% можно было бы применить в качестве окислителя жидкий озон или порошки алюминия и бериллия. Но это, в свою очередь,



Применение металлокерамических материалов, изготовленных методом порошковой металлургии, позволило значительно увеличить рабочие температуры современных ракетных двигателей.

Таблица 20. Зависимость давлений (горизонтальная шкала) от температур (вертикальная шкала), которые сопутствуют тем или иным физическим процессам в природе и технике.



В доменной печи при температуре около 2000° форсунки, через которые в нее нагнетается предварительно подогретый воздух, можно делать из... меди, если их усиленно охлаждать при помощи потока воды.

еще больше затруднит решение проблемы охлаждения двигателей и вызовет необходимость создания новых жаропрочных материалов для них. Горение в ракете — это, пожалуй, самое последнее достижение в области использования контролируемого количества теплоты, создаваемого при помощи химических реакций.

Более современных средств для увеличения рабочих температур следует ожидать от применения не химической, а ядерной энергии. Эти работы находятся только в самой начальной стадии. Дело тут еще и в том, что веществ, способных сколько-нибудь долго выдерживать эти температуры, в распоряжении ученых и инженеров пока еще нет. Вот почему так важно создать жаропрочные материалы, способные выдерживать сверхвысокие температуры.

ХИМИЯ ВЫСОКИХ ТЕМПЕРАТУР

Наиболее интересная для химика область температур лежит между 2000 и 5000°С. По мере движения вверх по этой шкале все привычные представления о химических реакциях оказываются бесполезными, так как мы попадаем в совершенно иной мир. Выше 2000° С жидкая вода не может существовать, несмотря ни на какие давления. Следовательно, исключаются все виды водных реакций. Твердое состояние могут сохранять лишь немногие вещества. В распоряжении химика останутся только простые и самые устойчивые молекулы газов, таких, как азот, окись углерода и др., состоящие не больше чем из двух или трех атомов. Нарушается обычное для более низких температур течение реакций, например окись углерода не сгорает в атмосфере кислорода. Выше 4000 или 5000°С распадаются молекулы, и в связи с этим практически прекращаются обычные химические реакции. Дело приходится иметь главным образом с ионами и атомами. Реакции, которые при обычных температурах проходят достаточно медленно, при 2000°С протекают так молниеносно, что наблюдать их невозможно.

При обычных температурах катализатор может значительно ускорить ход химической реакции. А при температуре 2000°С скорость и энергия реакции столь высоки, что катализатор уже не играет никакой роли.

В химической промышленности при помощи высоких температур получают ценные вещества, которые при обычных температурах очень сложно получить. Примером этого служит извлечение азота из воздуха. До сих пор, чтобы его добыть, широко применяли так называемый процесс Габера, в котором азот воздуха, соединяясь с водородом, дает аммиак. Этот процесс весьма сложен, дорог, требует катализатора и нагрева при высоком давлении. Сейчас выявляется возможность производства окиси азота при помощи нового, более простого способа — за счет использования высоких температур.

Если нагреть азот и кислород воздуха до 2100° С, то они с большой скоростью вступают в реакцию и образуют соединение, содержащее около 2% окиси азота. Однако если такой смеси дать возможность медленно остыть до комнатной температуры, то вся образовавшаяся в ней окись азота снова разделится на азот и кислород.

Но это соединение можно «заморозить», охладив его очень быстро с 2100 до 1500°С.

Тогда окись азота уже не будет распадаться на азот и кислород и при комнатной температуре. Процесс фиксации азота методом быстрого охлаждения осуществляется в специальных двухкамерных печах, в которых струя воздуха попеременно быстро нагревается и столь же быстро охлаждается в слое маленьких шариков магнезита.

Химия очень высоких температур полна интересных возможностей в будущем. Например, большие перспективы здесь открываются для получения озона.

Химия высоких температур не имеет дела со сложными органическими соединениями, так как свыше 2000° С они существовать уже не могут. Однако вполне возможны некоторые реакции с участием хлора и фтора. Главное затруднение здесь в том, что пока нет сосуда, который сам не вступал бы в реакцию с этими очень активными веществами.

Самую высокую температуру на Земле до сих пор можно было наблюдать лишь в пламени электрической дуги интенсивного горения в газовой среде, находящейся под давлением около 1000 *атм*. В ее всепожирающем пламени испаряется все, даже самые тугоплавкие материалы. В ближайшем будущем она, очевидно, будет применяться в химии и металлургии очень высоких температур.

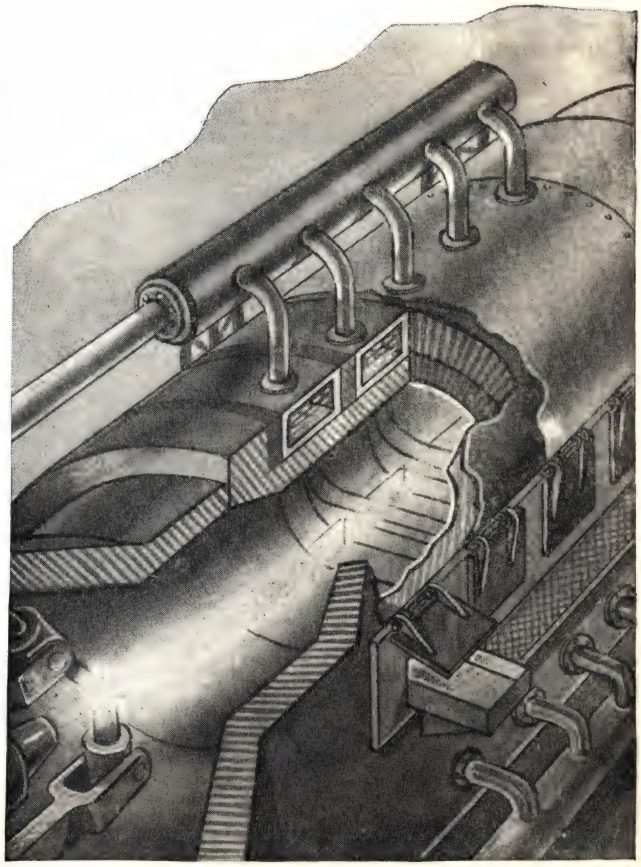
Чем отличается интенсивная дуга от обычной? В обычной дуге электрический ток в положительном электроде проходит только через область светящегося кратера. Этот кратер занимает лишь часть площади кончика угля. Таким образом, диаметр кратера зависит от величины протекающего через него тока: увеличивается при нарастании тока и сокращается при его уменьшении. Увеличение тока в этом случае не создает увеличения интенсивности (температуры и яркости) дуги, ток просто распределяется на бо́льшую площадь электрода.

Но вот кратер захватывает всю поверхность положительного электрода, и положение резко изменяется. Теперь увеличение тока, проходящего через одно и то же сечение электрода, вызывает увеличение интенсивности горения дуги, т. е. поднимает ее температуру и усиливает яркость свечения. Если при этом начать увеличивать проходящий через дугу ток, угли начинают плавиться.

В такой момент и наступает очень важное явление. Температура дуги неожиданно подскакивает до величины, сильно превышающей точку кипения углерода, и из положительного электрода вырывается ослепительно яркий и очень длинный язык белого пламени. Он уносит с собой избыток энергии, развиваемой электрическим током дуги.

В этом необычном состоянии дугу можно использовать как своеобразную высокотемпературную печь. Размельченное в очень тонкий порошок вещество, которое необходимо подвергнуть высокотемпературной химической обработке, примешивают к порошку, из которого делают положительный электрод. Испаряясь, это вещество попадает в длинное пламя дуги, где вступает в реакцию с любым другим веществом, вводимым в эту зону.

Двигаясь с большой скоростью, газообразное вещество мгновенно выносится из зоны высокой температуры и попадает в окружающую атмосферу. Здесь оно быстро охлаждается и конденсируется, т. е. по существу происходит то самое резкое охлаждение газов, которое играет столь важную роль в химии высоких



Высокотемпературная печь, работающая с помощью длинного факела пламени вольтовой дуги интенсивного горения, развивает температуру до 10 000°.

температур и при котором вступившие в химическую реакцию вещества обратно не распадаются.

Описанный процесс был использован для извлечения бериллия из руды. Факел пламени из положительного электрода, содержащий испарившийся углерод с примешанной к нему бериллиевой рудой, проходит через атмосферу газообразного хлора, который, соединяясь с испарившимся металлом, образует хлорид бериллия. Помимо бериллия, в руде обычно содержатся алюминий, железо и другие металлы. Соединяясь с хлором, они также образуют ряд металлических хлоридов, каждый из которых имеет свою, отличную от других температуру конденсации. Поэтому длинный факел пламени дуги пропускают по каналу, состоящему из нескольких отдельных камер. В каждой из них по мере понижения температуры пламени и происходит конденсация паров солей соответствующих металлов. Из этих осевших на дне камер солей затем при помощи электролиза извлекают чистый металл.

ОЧЕНЬ ВЫСОКИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ

К этой области можно условно отнести температуры, лежащие в пределах примерно от 10 000 до 25 000°С. Нет ни одного вещества на Земле, естественного или искусственного, которое в течение продолжительного времени могло бы выдержать нагрев свыше 10 000°С.

Однако получить такие температуры, правда на ничтожно короткое время, все же можно. Конденсатор большой емкости заряжают до напряжения в несколько сотен тысяч вольт и замыкают его тонким проводником из самого тугоплавкого материала. В результате возникает электрический разряд огромной силы. Он со взрывом расплавляет проводник, создавая на ничтожно короткий промежуток времени температуру в 10 000—20 000°С.

Пока подобные температуры, кроме астрономов, могут, пожалуй, интересовать лишь инженеров-астронавтов. Однако эта область скрывает в себе весьма важные физические процессы, которые уже в ближайшем будущем могут представить несомненный интерес и для физиков.

В последние годы ученые получили в свои руки новое устройство для исследования очень высоких температур. Речь идет о камере, в которой при помощи взрыва можно создавать ударные (взрывные) волны в газе, развивающие на короткое время огромные давления, а следовательно, и температуры. Действие камеры основано на известном факте, что при быстром сжатии газ нагревается. Когда же это давление нарастает с громадной скоростью, как это бывает в ударной волне, то в теплоту превращается значительная часть энергии движения газа (или тела, движущегося в газе). Например, при скорости, превышающей в четыре раза скорость звука, носовая часть реактивного самолета, если ее не охлаждать, нагрелась бы почти до 1000°С. При скорости, превышающей скорость звука в 10 раз, ударная волна может нагреть сжимаемую часть газа более чем до 3000°С.

Камера ударных волн представляет собой трубу, закрытую с обоих концов и разделенную на две части тонкой медной перепонкой. В одной ее части взрывается смесь водорода с кислородом. В результате в ней создается высокое давление, растущее до тех пор, пока оно не прорвет перепонку. Тогда в газе, заключенном во второй половине трубки, возникает и распространяется ударная волна, скорость которой может в 20 раз превышать скорость распространения звука. В другом типе камеры газ нагревают мощным электрическим разрядом. Это позволяет получить ударную волну, скорость которой уже в 34 раза превышает скорость звука.

Такие приборы позволяют изучать поведение газов, обладающих высокой энергией движения, и, в частности, их электрические и магнитные свойства. Наличие в таком газе большого числа свободных электронов делает его очень хорошим проводником тока, независимо от его химической природы.

Благодаря высокой проводимости длинная нить нагретого до очень высокой температуры газа ведет себя, как провод, помещенный в электрическом или магнитном поле. Подобное явление наблюдается во время выброса громадных масс раскаленных газов с поверхности Солнца, когда языки протуберанцев в своем движении искривляются под действием магнитного поля Солнца.

Столкновение в космическом пространстве двух гигантских газовых облаков или галактик тоже может привести к образованию в газовой среде ударных волн необычайной мощности. Ведь температуры и давления, развиваемые при подобных столкновениях, огромны. Так, голландский астроном Оорт объясняет свечение некоторых туманностей именно столкновением огромных масс межзвездного газа. Советский

астроном С. В. Пикельнер недавно применил теорию образования ударных волн для объяснения особого строения тонковолокнистых туманностей. Их обнаружили в тех местах Вселенной, где выброшенные из взорвавшейся сверхновой звезды потоки газа сталкиваются с облаками газа, находящимися в межзвездном пространстве.

Наконец, недавно было обнаружено мощное радиоизлучение в созвездии Лебедя. Причина его заключается в огромной ударной волне, проходящей через газовую среду двух сталкивающихся галактик. Это предположение подтверждается и снимками светящегося аргона во взрывной камере при прохождении в нем ударной волны. Самый яркий участок свечения газа совпадает с узкой полоской фронта ударной волны.

СВЕРХВЫСОКИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ

Рассмотрим некоторую замкнутую систему (объем) газа, которая не получает энергии из окружающего пространства и не отдает ему своей.

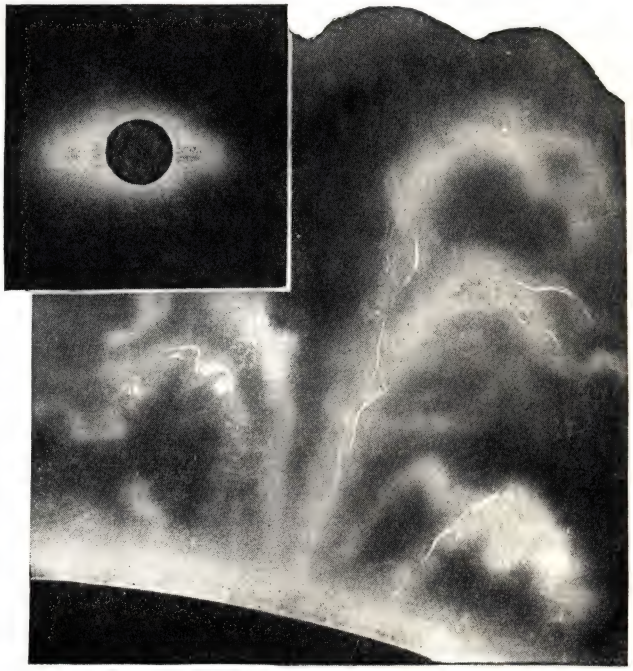
Собственная энергия такой системы, зависящая, естественно, от температуры, распределяется в ней равномерно благодаря беспорядочному движению и непрерывным столкновениям между собой частиц газа. В результате установится некоторое среднее энергетическое состояние среды. Такому состоянию будет соответствовать и некоторое среднее распределение скоростей движения частиц газа, хотя отдельные частицы его могут двигаться со скоростью или намного меньшей, или большей этой средней скорости всей совокупности частиц данного объема газа.

При столкновениях частиц газа между собой, в зависимости от скорости их движения, возникают электромагнитные излучения самых различных частот, а также взаимное поглощение этих излучений, которое тоже может иметь некоторое среднее распределение частот.

Когда мы рассматриваем физическое состояние газообразного вещества внутри звезд, то считаем, что его температура высока. При этом мы имеем в виду, что и средняя скорость движения частиц этого вещества и средняя интенсивность излучений, вызванных их столкновением между собой, весьма высоки. Но бывают случаи, когда система, отвечая условиям среднего распределения скорости частиц, не удовлетворяет условиям среднего распределения излучений. В этом случае высокая температура не означает, что она одновременно обладает и весьма интенсивным излучением. Этим, в частности, объясняется, почему видимая поверхность Солнца (фотосфера), имеющая температуру «всего» около 6000°С, создает значительно более мощное световое и тепловое излучение, чем солнечная корона, температура которой соответствует примерно 1 000 000°С.

Частицы вещества короны движутся со значительно бо́льшими скоростями, чем частицы фотосферы. Это и создает ее высокую температуру. Движение же частиц в фотосфере происходит со значительно меньшими скоростями, что объясняет ее более низкую температуру. Однако частицы вещества в короне столь далеки друг от друга, что столкновения между ними, вызывающие излучение, происходят значительно реже, чем в фотосфере. Вследствие этого энергия излучения фотосферы значительно превышает энергию излучения короны.

Вызывает интерес и другой вопрос: почему температура внутри Солнца достигает 10 млн.



В огромных струях раскаленных газов, выбрасываемых поверхностью Солнца, возникают ударные волны необычайной мощности, ионизирующие атомы вещества. Благодаря этому в струях газа, превратившихся в гигантские проводники, возникают электрические токи огромной силы. Под действием магнитного поля Солнца эти струи газа — протуберанцы — резко искривляются.

Новая наука — радиоастрономия — позволила обнаружить величественное явление природы — столкновение двух галактик в созвездии Лебедя. Благодаря тому, что звезды в галактиках расположены чрезвычайно далеко друг от друга, они не сталкиваются, и галактики свободно проходят одна сквозь другую. Однако огромные массы газа, окутывающие каждую из этих галактик, пройти одна сквозь другую не могут и, как упругие шары, отскакивают далеко друг от друга. При этом в них возникают ударные волны гигантской силы, сопровождающиеся мощным излучением радиоволн, принимаемых на Земле при помощи радиотелескопов.

градусов или даже выше, в то время как температура в недрах Земли, по-видимому, не превышает нескольких тысяч градусов?

В центре Земли вещество находится под давлением свыше 1,5 млн. *кГ/см²*. Такого давления все же недостаточно, чтобы вызвать распад твердых и жидких веществ. В центре Солнца давление достигает 500 млрд. *кГ/см²* и выше. Столь высокое давление неспособно выдержать ни одно обычное вещество. И если Солнце состояло бы из тех же самых веществ, из которых построена Земля, то при подобном давлении должно было бы произойти всеобщее обрушивание структуры атомов, а следовательно, и быстрое, заметное сжатие Солнца.

Однако такое сжатие имеет свои пределы. Под его действием внутренние части Солнца нагреваются все выше и выше, увеличивая свое внутреннее, обратное давление. Наступает своеобразное состояние равновесия, когда внутреннее давление газа уравновешивает давление всех вышележащих слоев вещества. Дальнейшее сокращение объема на этом должно прекратиться.

В свою очередь повышение температуры центральных частей Солнца вызывает практически полную ионизацию его вещества. Это приводит к появлению внутренних источников энергии и теплоты — термоядерных реакций воссоединения легчайших элементов в более тяжелые.

Таковы соображения, которые и привели астрономов к выводу о том, что температура и давление внутри звезд должны быть очень высокими и что в каждой звезде установилось состояние некоторого равновесия, автоматически поддерживаемое на определенном уровне.

Очень высокая температура, существующая внутри звезд, вызывает перемещение теплоты к их поверхности, естественно, более холодной. Это, в частности, объясняет, почему звезды светятся непрерывно. Они излучают энергию в пространство точно с такой же скоростью, с какой получают ее изнутри. Мера этого внутреннего обмена энергией определяет светимость звезды.

Таким образом, звезда излучала бы энергию, даже если бы внутри нее и не происходили столь мощные процессы, как термоядерные реакции. Основанием для этого неожиданного вывода служит описанный выше процесс сжатия под действием сил тяготения. Сжимаясь и разогреваясь, звезда будет излучать со своей поверхности и некоторое количество энергии. Однако подобный источник энергии недолговечен. Если бы Солнце светило только за счет одного сжатия, то оно давно бы погасло, просуществовав не более 20—30 млн. лет.

В настоящее время известно, что внутри Солнца и других звезд происходят ядерные реакции, в результате которых освобождаются колоссальные количества энергии. Так, например, объединение четырех протонов в одно ядро гелия сопровождается выделением огромного количества энергии. Это дает возмож-

ность звезде на чрезвычайно долгий промежуток времени сохранять свои размеры.

Если бы в данных условиях объем Солнца за счет сжатия несколько уменьшился, то вызванное этим увеличение его внутреннего давления и температуры ускорило бы течение термоядерных реакций. А следовательно, увеличилось бы и количество выделяющейся при этом энергии. Поскольку поверхность Солнца была бы не в состоянии излучать столь большой избыток энергии, это вызывало бы повышение внутреннего давления. А оно в свою очередь увеличило бы Солнце до его теперешних размеров.

И, наоборот, если бы Солнце стало несколько больше его настоящих размеров, то с уменьшением внутренней температуры количество энергии, создающейся внутри него за счет термоядерных реакций, уменьшилось бы. Эта потеря энергии вызвала бы падение внутреннего давления и, как следствие, уменьшение размеров Солнца до его теперешнего состояния.

Таков краткий итог нашего, далеко еще не полного путешествия в мир температур и давлений. Степенями разрежения и уплотнения материи, медленным, почти не обнаруживаемым перемещением частиц или бешеным вихрем их движения не ограничивается бесконечное разнообразие форм существования и движения материи. Она ведь одновременно находится и в стадии разрушения и в стадии созидания самых разнообразных своих элементов. Чем больше человек изучает этот увлекательный величественный и беспредельный мир, тем глубже он познает управляющие им законы и шире использует их для своих нужд.

ФИЗИЧЕСКИЕ ПРИНЦИПЫ РАБОТЫ ТЕПЛОВЫХ МАШИН

Машина, которая работает, приводит в движение станки и поезда, суда и автомобили, называется двигателем. Тепловой двигатель — это машина, работающая за счет теплоты, машина, в которой происходит превращение теплоты в работу.

Тепловые двигатели широко известны. Это — судовые, автомобильные, авиационные, мотоциклетные и многие другие (подробнее о них см. в т. 5 ДЭ). На первый взгляд работа тепловых двигателей может показаться несложной. Топливо горит, давление газов возрастает, газ толкает поршень — и вот уже быстро мчится ваш мотоцикл. Но создавать и применять тепловые двигатели так успешно было бы нельзя, если бы ученые не исследовали подробно, как же именно, по каким законам природы и с каким эффектом происходит в тепловых двигателях очень сложный процесс преобразования теплоты в работу.

На первый взгляд может показаться, что между теплотой, вызывающей изменение температуры, и работой, проявляющейся, скажем, в виде вращения вала двигателя, нет ничего общего. В действительности это не так. Для теплоты и работы общим является движение, с той разницей, что механическая работа — движение больших и сложных тел, таких, например, как мотоцикл, а теплота — это движение молекул, из которых состоят все тела.

Еще в 1748 г. великий русский ученый Михаил Васильевич Ломоносов утверждал, что «причина теплоты состоит во внутреннем вращательном движении связанной материи». Он сделал вывод о том, что чем сильнее нагрето тело, чем больше подведено к нему теплоты, тем быстрее происходит внутреннее движение его частиц — молекул.

Значит, в двигателе вашего мотоцикла беспорядочное, неопределенное движение молекул газа, происходящее с громадными скоростями, превращается в упорядоченное, определенное, равномерное вращательное движение, передаваемое цепью ведущему колесу. Нельзя ли посмотреть, как в цилиндре мотоцикла наводится порядок и беспорядочное движение молекул превращается в строго определенное движение поршня? Непосредственно на работе мотоциклетного двигателя этого увидеть нельзя.

Сначала необходимо познакомиться с работой самой простой тепловой машины, настолько простой, что она даже неудобна для практического применения. Зато в такой простейшей тепловой машине, которую нетрудно соорудить самому, мы сможем очень отчетливо увидеть на опыте, как из невидимого хаотического движения миллиардов молекул возникает ясно видимое упорядоченное движение.

Расширение тел при нагревании вызывается увеличением скорости и размаха колебаний

частиц, составляющих тело; оно тем больше, чем сильнее нагрев. Поэтому для нашего простейшего двигателя нужно взять физическое тело, способное выдерживать высокую температуру. Возьмем в качестве такого тела круглый металлический стержень и соорудим из него простейший тепловой двигатель (рис. 1).

Этот двигатель состоит из металлического стержня *1*, упирающегося слева в крепкую стойку *2*, а справа — в нижний конец рычага *3*, соединенного со стойкой нашей машины шарниром *4* и связанного в верхней своей части с подвешенным к нему тяжелым грузом *5*. Под стержнем расположена газовая горелка *6*, которая соединена с газопроводом краном *7*.

Заметим положение груза по стрелке-указателю *8*, затем откроем кран *7* и зажжем газ. Наш двигатель начнет работать. По мере нагревания стержня он будет удлиняться и отклонять рычаг *3*, поднимая груз. Это легко заметить по увеличившемуся расстоянию от стрелки-указателя. Зная величину веса груза (например, 5 *кГ*) и величину подъема (например, 5 *мм*), мы легко определим, какая проделана работа. Это будет произведение силы на пройденный путь:

$$5\ кГ \times 5\ мм = 25\ кГ \cdot мм.$$

За счет чего получена эта работа? Конечно, за счет теплоты. Какое-то количество газа сгорело (точный газовый счетчик всегда может определить это количество), при этом выделилось какое-то количество теплоты (его можно подсчитать, зная теплотворную способность топлива). А эта теплота в нашей нехитрой машине превращена в работу путем использования теплового расширения тел.

Вся ли теплота, выделившаяся при сгорании газа, превращена здесь в работу? Без ответа на этот вопрос мы не сможем ответить и на вопрос о том, вся ли теплота, выделяющаяся при сгорании бензина в цилиндре нашего мотоцикла, превращается в работу. Постараемся подробнее разобраться в результатах нашего несложного опыта и сделать из него некоторые выводы.

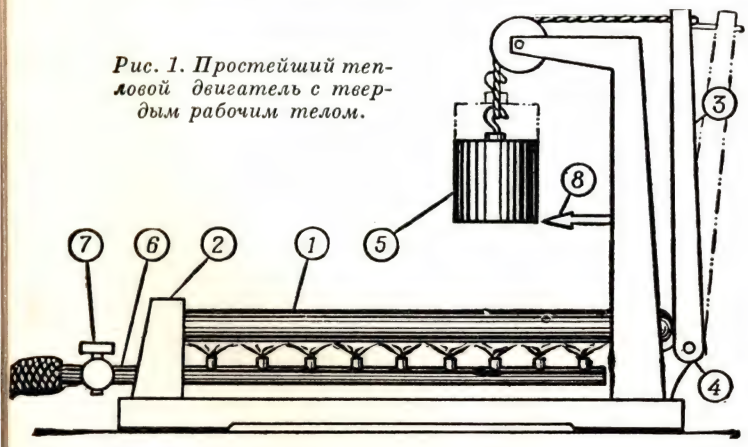


Рис. 1. Простейший тепловой двигатель с твердым рабочим телом.

Вывод первый. Прежде всего из нашего опыта видно, что для превращения теплоты в работу необходимо иметь какое-либо физическое тело, в котором можно осуществить тепловое расширение за счет нагревания. Это физическое тело применяют, чтобы осуществить преобразование теплоты в механическую работу. Называют его рабочим телом. В нашем простейшем тепловом двигателе таким рабочим телом служит металлический стержень, в мотоцикле — газы, получающиеся при сгорании бензина, а в паровой турбине — водяной пар.

Вывод второй. Во время нашего опыта с металлическим стержнем произошли заметные изменения. Из холодного он стал горячим; следовательно, в начале нашего опыта стержень находился в одном тепловом состоянии (температура и объем в начале опыта), а в конце опыта — в другом (температура и объем в конце опыта). Значит, происшедшие в рабочем теле изменения — это переход из одного теплового состояния в другое. Такой переход носит название процесса. Процессы, очевидно, происходят и в цилиндре мотоцикла, где при каждой вспышке бензина изменяется и температура, и давление газа, и его объем.

О тепловом состоянии тела можно судить по так называемым параметрам теплового состояния. О некоторых из них мы уже упомянули, это температура и объем. Для исследования теплового состояния удобнее пользоваться так называемым удельным объемом, т. е. объемом, который занимает единица массы рабочего тела, например один килограмм. Очень важный параметр — давление. Существуют и другие параметры, но мы сначала постараемся разобраться в физической сущности работы тепловых двигателей только при помощи трех параметров: температуры, давления и удельного объема. В науке их принято обозначать буквами: температуру — T, давление — P и удельный объем — v.

Все параметры теплового состояния тела тесно связаны между собой, и одновременно им всем нельзя придавать произвольные значения. Эта связь существует потому, что вели-

чина каждого из параметров определяется одним и тем же движением молекул. Уменьшите объем — расстояния между молекулами станут меньше, они будут чаще сталкиваться, что приведет к повышению температуры, при этом они будут чаще и сильнее ударяться о стенки, что в свою очередь приведет к повышению давления.

Физическая связь параметров между собой имеет математическое выражение. Это дает возможность точно рассчитывать и проектировать тепловые двигатели. Представим для упрощения, что в качестве рабочего тела теплового двигателя взят идеальный газ[1]. Молекулы газа сталкиваются, при этом происходит абсолютно упругий удар. В промежутках между ударами друг о друга молекулы движутся прямолинейно. Тогда можно найти очень простое уравнение состояния — формулу, показывающую характер связи между параметрами такого газа. Эта формула имеет такой вид:

$$P \cdot v = R \cdot T,$$

где P, v и T — известные нам параметры: давление, удельный объем и температура, а R — так называемая газовая постоянная — величина, характеризующая работоспособность того или иного газа.

Из этой формулы видно, что если температуру рабочего тела поддерживать постоянной, то увеличению давления в несколько раз будет сопутствовать уменьшение объема во столько же раз. При уменьшении давления объем соответственно возрастет во столько же раз. При постоянном объеме увеличение температуры вызовет такое же увеличение давления, а при постоянном давлении изменение температуры вызовет соответственные изменения объема.

Таким образом, уравнение состояния дает возможность по двум параметрам (обычно таким, которые легче измерить: по температуре и давлению) определить третий. Но приведенное уравнение справедливо только для воображаемого, идеального газа. Для существующих в действительности и в особенности для сжатых газов уравнения получаются чрезвычайно сложными, и поэтому часто состояние рабочих тел определяют опытным путем.

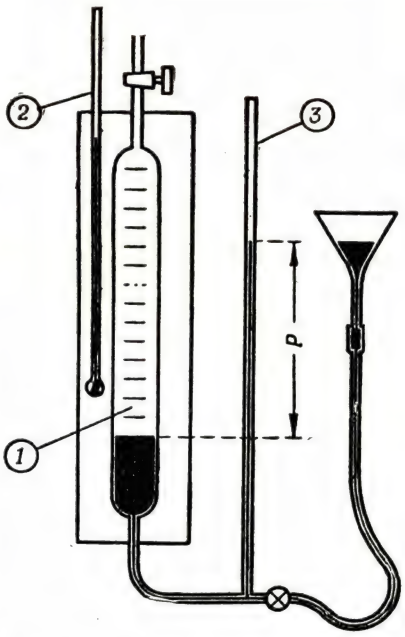


Рис. 2. Прибор для определения состояния рабочего тела.

Такой опыт вы можете провести сами при помощи показанного на рис. 2 прибора, где исследуется рабочее тело — газ, заключенный в пробирке *1* с делениями, позволяющими измерять величину его удельного объема. Термометр *2* измеряет температуру, а давление измеряется величиной столба жидкости (воды или ртути) в манометре *3*.

Для исследования рабочих тел тепловых двигателей, работающих при больших давлениях и температурах, нужны более сложные приборы. Это опытные или экспериментальные установки, предназначенные для исследования зависимости между температурой и давлением при постоянном объеме рабочего тела.

Исследуемый газ или пар в одной из таких установок заключен в прочный стальной баллон, нагреваемый электрической спиралью. Для выравнивания температуры применен медный цилиндр, а для уменьшения потерь теплоты — двойная изоляция.

Наружный изолятор представляет собой сосуд с водой, изменение температуры которой позволяет регистрировать утечку теплоты. Количество выделенной спиралью теплоты точно измеряется по расходу электроэнергии при помощи амперметра и вольтметра.

Для измерения температуры внутри баллона применяют термопары. Измеряя гальванометром ток от термопары внутри баллона, можно определить разность между температурой исследуемого рабочего тела и температурой тающего льда, в который помещен второй спай термопары.

Эта установка очень сложна и включает в себя много точнейших измерительных приборов. Исследование на ней требует специальной научной подготовки.

---

[1] Идеальный газ — это такое воображаемое газообразное вещество, молекулы которого очень малы по сравнению с расстояниями между ними, а силы взаимодействия между молекулами отсутствуют. Понятие идеального газа очень удобно для теоретических расчетов. К идеальному газу приближаются по указанным свойствам разреженные газы.

Теперь, когда мы познакомились с тепловым состоянием тел и процессами перехода от одного теплового состояния к другому, вернемся к нашему простейшему тепловому двигателю.

Вывод третий. В проведенном нами опыте произошло два заметных явления. Первое — стержень нагрелся, т. е. изменил свое тепловое состояние. Второе — груз поднялся, следовательно, совершена механическая работа. Очевидно, оба явления имеют одну общую причину — подвод теплоты, ведь до этого не было ни нагревания, ни подъема груза. Значит, подведенная теплота затрачена, во-первых, на нагревание стержня и, во-вторых, на подъем груза. А это в свою очередь говорит о том, что *не вся подведенная к стержню теплота превращена в механическую работу.*

Такой результат нашего опыта справедлив для любого теплового двигателя. Ведь без теплового расширения нельзя получить работу. А для этого необходимо нагреть тело. Значит, по законам природы в тепловом двигателе невозможно всю использованную теплоту превратить в механическую работу. Это хорошо видно и на примере мотоцикла. Отработавшие газы его очень горячи и уносят с собой много теплоты, не превращенной двигателем в механическую работу. Легко в этом убедиться, установив термометр или термопару в устье выхлопного конуса мотоцикла, работающего на опытном станке.

Вспомним, что при нагревании тела тепловое движение молекул усиливается, при этом возрастает их кинетическая энергия, а следовательно, и внутренняя энергия тела. Судить об этом можно по повышению температуры тела.

Тогда мы можем сказать, что затраченная на нагревание нашего стержня теплота пошла, во-первых, на совершение внешней работы (подъем груза) и, во-вторых, на увеличение внутренней энергии стержня, которая является еще одним важным параметром теплового состояния тела.

Внутренняя энергия тела связана с его температурой. По изменениям температуры можно проследить за изменениями внутренней энергии тела. Изменение внутренней энергии может быть достигнуто не только путем подвода или отвода теплоты (нагрева или охлаждения). На рис. 3 показаны три способа изменения внутренней энергии тела, которые вы можете испробовать сами: 1) путем изменения объема тела, например сжатия (*1*), работа при этом идет на увеличение потенциальной энергии молекул, а следовательно, и внутренней энергии тела; 2) путем подвода или отвода теплоты: подводимая при нагревании тела теплота (*2*) ведет к увеличению кинетической энергии теплового движения, а следовательно, и внутренней энергии тела и, наконец, 3) путем одновременного изменения объема и подвода или отвода теплоты, например одновременное сжатие и нагревание (*3*). Можно так комбинировать подвод теплоты (нагревание) с увеличением объема (расширением), что при этом внутренняя энергия будет оставаться постоянной. В этом единственном случае вся теплота, подведенная к рабочему телу, пойдет целиком на внешнюю работу расширения. Поразмыслив, вы убедитесь, что это не противоречит сделанному выше выводу о том, что в тепловом двигателе превратить в работу всю теплоту невозможно. Дальше мы еще вернемся к этому вопросу.

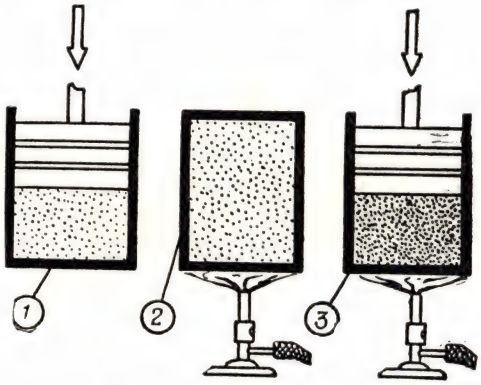


Рис. 3. Три способа изменения внутренней энергии тела.

Из нашего опыта с простейшим двигателем в виде стержня мы получили очень важный вывод, состоящий в том, что *подведенная к телу теплота равна изменению внутренней энергии тела и совершенной телом внешней работе.*

Эта формула выражает собой первый закон термодинамики — науки, изучающей взаимопревращения теплоты и работы, — и представляет собой частный случай проявления всеобщего закона природы: закона сохранения и превращения энергии.

Из первого закона термодинамики следует вывод: невозможно построить такой тепловой двигатель, который производил бы механическую работу без соответствующей затраты теплоты. Такой двигатель ученые назвали «перпетуум-мобиле первого рода», т. е. «вечный двигатель первого рода». Но оказывается, что

и затраты теплоты еще недостаточно, чтобы получить тепловой двигатель, а поэтому существует понятие о «перпетуум-мобиле второго рода», с которым мы познакомимся позднее.

Вывод четвертый. Вернемся к нашему тепловому двигателю. Постараемся получить от него как можно больше работы. Для этого нужно заставить его работать возможно дольше. Но как это сделать? Нагревать наш стержень все сильнее и сильнее? Но в конце концов он нагреется до температуры пламени горелки и дальше нагреваться не сможет. Применить источник с более высокой температурой, например электрическую дугу? Но тогда стержень расплавится, и наш двигатель будет безнадежно испорчен.

Можно найти в данном случае только один выход: не продолжать наш опыт, а повторять его много-много раз, затрачивая каждый раз известное количество теплоты и получая соответственное количество работы. При достаточном запасе горючего наш опыт можно повторять годами, превращая в механическую работу теплоту горения тысяч кубометров газа.

Но для того чтобы повторить опыт, необходимо сначала привести наш тепловой двигатель к начальному положению, т. е. к начальному состоянию рабочего тела — металлического стержня. Если первый путь был путем нагревания, то обратный путь должен быть путем охлаждения. Если в нашем опыте мы стержень из холодного сделали горячим, подводя к нему теплоту, то для того чтобы сделать его снова холодным, необходимо отвести от него теплоту. Тогда мы заставим наш тепловой двигатель работать сколь угодно долго, производя необходимую механическую работу, которая у нашего двигателя несколько усложнится. Она будет теперь складываться из двух чередующихся процессов. Первый процесс: подвод теплоты, увеличение внутренней энергии рабочего тела, увеличение температуры и удельного объема — подъем груза. Второй процесс: отвод теплоты, уменьшение внутренней энергии рабочего тела, понижение его температуры, уменьшение удельного объема — опускание груза.

Необходимость периодического повторения описанных процессов показывает, что тепловой двигатель — периодически действующий двигатель. О периодичности действия тепловых двигателей убедительно говорит своим громким треском ваш мотоцикл, так как каждый новый звук выхлопа знаменует завершение отдельного периода работы двигателя.

Вывод пятый. Из перечисленных выше изменений, происходящих в периодически действующем тепловом двигателе, остановим свое внимание на двух: на подводе и на отводе теплоты. Как выполнить эти процессы? Первый мы выполняли, сжигая газ. Теплота от горящего газа сама собою стала переходить к стержню потому, что таково природное свойство теплоты: теплота сама собой переходит от тел с более высокой температурой к телам с более низкой температурой, но никогда — в обратном направлении. Здесь наблюдается большое сходство с движением воды—всегда только с верхнего уровня на нижний.

Описанный закон природы показывает, что для осуществления процесса охлаждения стержня надо найти тело или среду с более низкой, чем у стержня, температурой. В этом случае теплота сама собой будет переходить от стержня к этому телу или среде. В нашем опыте мы можем использовать ту же среду, которую с успехом используют и многие реальные тепловые двигатели,— холодную воду. Существуют тепловые двигатели, носящие название двигателей с воздушным охлаждением. К таким двигателям относится и двигатель нашего мотоцикла, цилиндр которого имеет много тонких металлических ребрышек, сделанных для того, чтобы воздух лучше охлаждал головку цилиндра. Воздуху же отдается и главная часть неиспользованной теплоты — она уносится с отработавшими газами. Покидая выхлопную трубу мотоцикла, горячие газы поступают в громадный холодильник — атмосферу.

Значит, для получения работы от периодически действующего теплового двигателя еще недостаточно иметь большое количество теплоты, точно так же, как нельзя получить работу от водяного колеса, построенного на берегу озера. Почему? Потому что воде некуда двигаться — опускаться с высшего уровня к низшему, так как уровень у озера один-единственный. Воды много, а толку мало! Так и с теплотой. Надо найти путь для движения теплоты с высшего уровня, определяемого высокой температурой, к низшему, определяемому более низкой температурой.

Это значит, что, если для водяного двигателя нужны два уровня, два горизонта, для теплового двигателя также необходимы два уровня, две температуры. В нашем опыте для совершения работы периодически действующим тепловым двигателем мы пользовались двумя источниками с разным температурным уровнем: пламенем газовой горелки и холодной водой.

О необходимости двух источников теплоты для работы теплового двигателя говорит второй закон термодинамики, из которого следует, что невозможно построить «перпетуум-мобиле второго рода», т. е. такой периодически действующий тепловой двигатель, который производил бы работу при наличии одного только источника теплоты, одного только температурного уровня. К сожалению, не все знают выводы второго закона термодинамики и иногда безуспешно пытаются изобрести вечный двигатель второго рода.

Сделанные нами пять выводов показывают, что для действия теплового двигателя нужны рабочее тело и два источника теплоты с разными температурными уровнями, дающими возможность построить периодически действующий тепловой двигатель. Однако мы еще не знаем, что нужно для того, чтобы наш двигатель работал экономично, потреблял мало топлива.

Тепловые двигатели изобретены в XVIII в. Это были паровые двигатели, потреблявшие до 75 *кГ* угля для получения мощности в одну лошадиную силу. Современные паровые двигатели потребляют только 400 *Г*, т. е. почти в 200 раз меньше.

Для того чтобы понять, как удалось этого добиться, мы должны подробнее рассмотреть процессы, происходящие при превращении теплоты в работу, и прежде всего обязательные для тепловой машины изменения состояния рабочего тела.

Поставим новый опыт. Для этого прежде всего подберем наиболее удобное рабочее тело. Металлический стержень, как в нашем первом опыте, не применяется в качестве рабочего тела в промышленных тепловых двигателях, так как металл, даже будучи нагретым до весьма высокой температуры, лишь незначительно изменяет свой объем. Это объясняется тем, что частицы твердых тел в сильной степени связаны силами сцепления и их тепловое движение ограничивается колебаниями около узлов кристаллической решетки. Иначе обстоит дело в газах, молекулы которых движутся свободнее, а межмолекулярные расстояния значительно больше. Поэтому и тепловое расширение газов гораздо значительнее, чем у твердых тел.

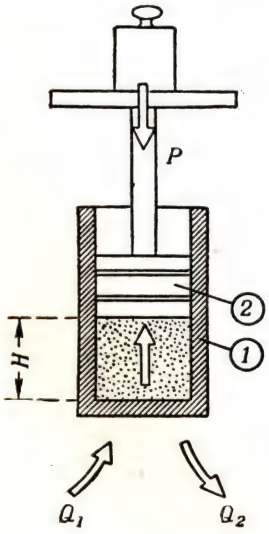


Рис. 4. Простейший тепловой двигатель с газообразным рабочим телом.

На рис. 4 изображен простейший тепловой двигатель, рабочим телом которого является газ. Этот двигатель представляет собой цилиндр *1* с подвижным поршнем *2*, движения которого изменяют объем газа, заключенного в полости цилиндра, так что по перемещению поршня мы имеем возможность судить об изменении объема газа. Нагружая поршень грузами различной величины, мы сможем получать в полости цилиндра желательное давление. Зная же значение объема, мы можем вычислить и удельный объем, а зная удельный объем и давление, можно по уравнению состояния определить и третий параметр — температуру. Таким образом, наш простейший двигатель, с одной стороны, приближается к действительным (мотоциклетный двигатель имеет один или два цилиндра с поршнями), а с другой стороны — к лабораторному прибору, представленному на рис. 2. Наш простейший двигатель дает возможность получать непосредственно из опыта и значение интересующей нас величины работы двигателя. Действительно, при изменении объема поршень проходит некоторый путь в направлении действия силы (веса груза на поршне и самого поршня), а нам известно из физики, что произведение этих двух величин дает нам величину работы.

Изменения давления и объема, непосредственно измеряемых в нашем опыте, удобно проследить графически, на диаграмме. Диаграмма — один из лучших методов научного и технического исследования. Обращаясь к диаграмме, вы тем самым начинаете овладевать научным орудием познания, делаете большой шаг в развитии вашего научного мышления.

На рис. 5 показано, как можно перейти от физических процессов, происходящих в рабочем теле, заключенном в полости цилиндра, к графическому изображению этих процессов. Для этого нужно взять цилиндр с поршнем (можно использовать садовый опрыскиватель). К выходному отверстию цилиндра при помощи резиновой трубки нужно присоединить ртутный или водяной манометр в виде изогнутой стеклянной трубки. По высоте жидкости в этой трубке мы можем судить о давлении рабочего тела (например, воздуха), а по положению поршня — об объеме.

Начнем наш опыт. Переместим поршень из

положения, обозначенного буквой A, в положение, обозначенное буквой B. Это означает, что объем газа изменился от величины V_1, представленной в каком-то масштабе отрезком линии на диаграмме, до величины V_2. Изменилось и давление. При положении поршня A давление имело величину, отложенную на нашей диаграмме в виде отрезка P_1, пропорционального высоте жидкости в трубке манометра, а при положении поршня B стало соответствовать отрезку P_2.

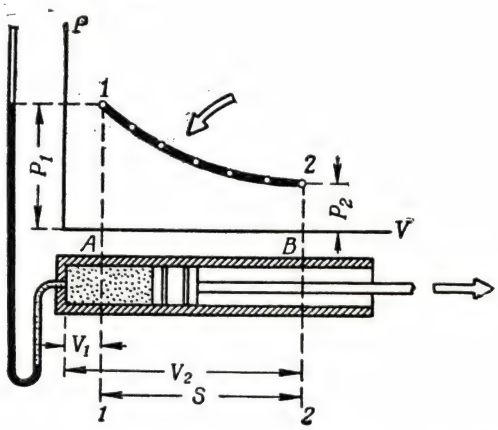


Рис. 5. Диаграмма состояния рабочего тела при перемещении поршня.

На нашей диаграмме мы получили две точки: *1* и *2*. Каждая из этих точек будет представлять состояние рабочего тела при местонахождении поршня в точках A и B. Таким образом, на диаграмме мы как бы видим своими глазами невидимое в действительности состояние рабочего тела. Более того, изменяя понемногу положение поршня и нанося на диаграмму значение объема и давления для каждого его положения, мы получим ряд промежуточных точек. Соединив эти точки плавной линией, мы «увидим» процесс изменения состояния.

Умение «видеть» невидимый процесс имеет громадное значение в развитии любой науки. Что касается тепловых двигателей, то, получив при помощи особого прибора — индикатора — запись процессов, происходящих в цилиндре двигателя, инженеры на основании такой индикаторной диаграммы могут судить о работе двигателя. И наоборот, для еще не существующего двигателя, задуманного конструктором, вычерчивается заранее теоретически рассчитанная диаграмма, а по ней совершенно безошибочно вычисляются размеры и прочность частей будущего двигателя.

На нашей диаграмме параллельно горизонтальной оси откладываются значения удельных объемов рабочего тела, а параллельно вертикальной оси — соответствующие значения его давлений. Поэтому такая диаграмма называется Pv-диаграммой или диаграммой в Pv-координатах.

Pv-диаграмма дает возможность судить не только о характере процесса изменения состояния рабочего тела, но и о самой работе. Чтобы убедиться в этом, поставим опыт с нашим двигателем таким образом, чтобы при увеличении объема, вызванного движением поршня, давление оставалось постоянным. Для этого нам придется во время движения поршня подогревать рабочее тело, следя за тем, чтобы высота столбика жидкости в нашем манометре оставалась неизменной. В результате расширения при постоянном давлении P мы получим изображение нашего процесса в виде прямой линии *1—2* (рис. 6), соответствующей пройденному поршнем пути S.

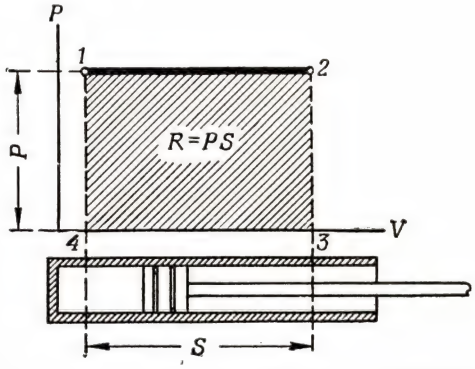


Рис. 6. Диаграмма работы расширения при постоянном давлении.

Рассмотрим заштрихованный прямоугольник *1—2—3—4*. Чему равна заштрихованная площадь? По правилам геометрии, она равна произведению основания на высоту, т. е. произведению отрезка *1—2* на отрезок *1—4*. Но отрезок *1—4* в каком-то масштабе представляет давление P, а отрезок *1—2* — изменение объема, соответствующее пути S, пройденному поршнем. Мы знаем, давление измеряется силой, действующей на один квадратный сантиметр площади поршня; умножив давление на площадь поршня, получим силу, действующую на весь поршень нашего двигателя. Умножив силу на путь, пройденный поршнем, получим работу. Таким образом, величина площади заштрихованного четырехугольника *1—2—3—4* представляет собой не что иное,

как работу, производимую машиной в течение процесса расширения рабочего тела.

Наш вывод остается справедливым для площадки любой формы, и прямоугольная площадка была выбрана нами только для простоты доказательства. Представленный на рис. 7 процесс *1—2* в Pv-координатах также изображает работу в виде заштрихованной на рисунке площадки под кривой процесса. Так, диаграмма дает нам возможность графически представить и подсчитать количество работы, полученной при том или ином процессе изменения состояния рабочего тела.

Полученной? А откуда это видно? Может быть, наоборот, нужно совершать работу, представленную площадкой, чтобы получить процесс, представленный линией *1—2*.

На этот вопрос нетрудно дать ответ. Знак работы (т. е. совершена ли она телом или над телом) определяется направлением процесса. Мы видели еще на первом опыте со стержнем, что работа получается при расширении рабочего тела. И, наоборот, сжатия рабочего тела можно достигнуть, совершив работу над телом. В этом нетрудно убедиться, рассмотрев рис. 4, из которого видно, что для опускания поршня нужно нагрузить его, т. е. совершить работу. Отсюда легко запомнить простое правило: если процесс происходит с расширением рабочего тела, с увеличением его объема (что соответствует движению по стрелке *А* на рис. 7), то площадка под линией процесса будет представлять положительную, т. е. совершенную телом, работу.

Если же процесс происходит со сжатием рабочего тела, с уменьшением его объема (что соответствует движению по стрелке *Б*), то площадка под линией процесса будет представлять отрицательную, т. е. совершенную над телом, работу. Ученые условились процессы, при которых тело совершает работу, называть прямыми, а процессы, при которых работа совершается над телом, — обратными.

Так, на рис. 7 процесс, протекающий по стрелке *А*, будет прямым, а по стрелке *Б* — обратным.

При первом опыте со стержнем мы установили, что тепловой двигатель — это периодически действующий двигатель: в нем периодически чередуются процессы расширения и процессы сжатия, возвращающие рабочее тело к начальному состоянию. Теперь мы сможем увидеть на Pv-диаграмме отчетливую картину работы периодически действующего теплового двигателя, причем диаграмма покажет нам пути к наивыгоднейшей работе, к наивысшей эффективности нашего теплового двигателя.

Для этого рассмотрим диаграмму на рис. 8, на которой в Pv-координатах изображены два процесса: прямой, представленный двойной линией, и обратный, представленный простой линией.

Предположим, что двойная линия получена нами в результате измерения объемов и давлений при процессе, протекавшем в полости цилиндра (рис. 4), когда мы подводили к рабочему телу теплоту Q_1 и получали работу подъема груза на высоту *Н*. На рис. 8 эта работа представлена заштрихованной вертикальными линиями площадкой под двойной линией процесса расширения газа.

Но тепловой двигатель — двигатель периодического действия. Поэтому для дальнейшей его работы необходимо возвратить рабочее тело к первоначальному состоянию. На нашей диаграмме оно представлено точкой *1* с соответствующими ей значениями удельного объема и давления.

Как это сделать? Очевидно, необходимо сжать рабочее тело до первоначального объема и первоначального давления, перейти от состояния, показанного точкой *2*, к состоянию, показанному точкой *1*. Этот переход можно выполнить многими путями, чему будет соответствовать много линий, соединяющих точки *2* и *1* на нашей диаграмме.

Предположим, что мы вернулись в точку *1* по тому же самому пути, по которому происходил процесс, только в обратном направлении. Площадка под двойной линией, представляющая

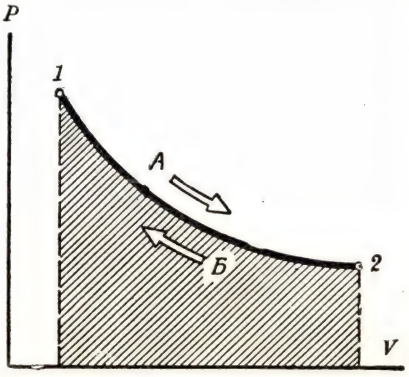


Рис. 7. Прямой и обратный процессы.

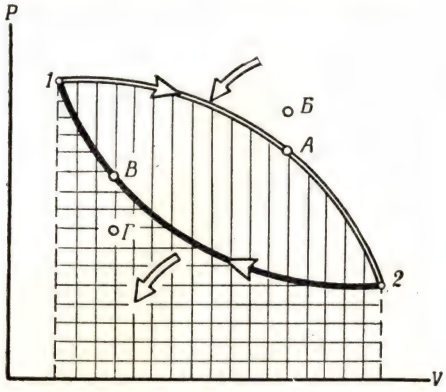


Рис. 8. Цикл теплового двигателя.

работу, полученную при расширении от точки *1* к точке *2*, будет одновременно представлять работу, затраченную на сжатие от точки *2* к точке *1*. А при равенстве полученной и затраченной работы мы не получим никакой внешней работы от нашего двигателя. Для того чтобы ее получить, нужно, очевидно, чтобы затраченная на сжатие работа была меньше полученной при расширении. Для этого необходимо, чтобы *линия обратного процесса проходила ниже линии прямого процесса*, так, например, как показано на рисунке сплошной линией между точками *1* и *2*. Тогда работа сжатия, представленная площадкой, заштрихованной горизонтальными линиями, будет меньше, чем работа расширения. На какую величину? Как раз на такую, которая представлена площадкой между двойной и сплошной линиями.

Теперь мы можем сделать очень важный вывод. Два процесса, изображенных на рис. 8, при чередовании которых рабочее тело периодически возвращается в первоначальное состояние, представляют собой ц и к л работы теплового двигателя. Вся его работа состоит из повторения подобных циклов, так что, зная цикл, мы знаем и работу двигателя. Оказывается, что в *Pv-диаграмме площадка, очерченная циклом, представляет полученную внешним потребителем полезную работу*. Очевидно, чем больше будет эта площадка, тем производительнее будет наш двигатель. А чтобы эта площадка была больше, нужно, чтобы двойная линия прямого процесса проходила на диаграмме как можно выше, а сплошная линия обратного процесса — как можно ниже.

Это легко начертить на диаграмме, но как этого добиться в реальном двигателе?

Мы уже знаем, что «выше» или «ниже» на диаграмме означает в реальной машине более высокое или более низкое давление. Что значит, например, поднять на нашем рисунке точку *А* в положение *Б*? Это значит повысить давление рабочего тела. А как можно повысить давление рабочего тела при постоянном объеме? Только нагревая рабочее тело, подводя к нему теплоту, повышая его температуру, его внутреннюю энергию. Чем сильнее мы нагреем рабочее тело, тем большее количество теплоты Q_1 подведем к нему, тем выше пройдет на диаграмме двойная линия прямого процесса, тем больше будет площадка, представляющая работу расширения.

А что значит опустить на нашем рисунке точку *В* в положение *Г*? Это значит понизить давление рабочего тела. При постоянном объеме это можно сделать только охлаждая рабочее тело, отводя от него теплоту Q_2, понижая его температуру, уменьшая величину его внутренней энергии. Чем сильнее охладим мы рабочее тело в процессе расширения, тем ниже пойдет линия обратного процесса, тем большее количество теплоты будет превращено в работу и меньшее — передано холодному источнику.

Проведенное с помощью диаграмм исследование подтверждает наш вывод из первого опыта со стержнем о цикличности в работе тепловых двигателей, о необходимости двух источников теплоты для получения механической работы. Более того, теперь нам известно, что чем больше теплоты мы сумеем подвести к каждому килограмму рабочего тела от верхнего источника и чем меньше отвести к нижнему, тем эффективнее будет работать наш тепловой двигатель.

Если мы сумели подвести к каждому килограмму рабочего тела за цикл Q_1 калорий теплоты, а передать в холодильник Q_2 калорий, то их разность представит теплоту, превращенную в механическую работу: $Q_1 - Q_2$ соответствует механической работе, совершенной телом.

Какую же долю из отданной рабочему телу теплоты Q_1 удалось превратить в механическую работу, соответствующую разности $Q_1 - Q_2$?

Очевидно, эта доля составит:

$$\frac{Q_1 - Q_2}{Q_1}.$$

Полученная нами простая формула показывает к о э ф ф и ц и е н т п о л е з н о г о д е й с т в и я теплового двигателя (сокращенно к.п.д.). Величина к.п.д. указывает на то, какую долю теплоты, подведенной к рабочему телу, мы сумели превратить в работу.

Какие выводы можно сделать из этой важной формулы?

Если $Q_1 = Q_2$, то коэффициент полезного действия будет равен нулю. Это значит, что вся теплота, сообщенная рабочему телу, прошла через него в холодильник, не превращаясь в работу. На рис. 8 это соответствует тому случаю, когда прямой и обратный процессы протекают по одной и той же кривой.

Если $Q_2 = 0$, то величина к.п.д. будет равна единице. Это значит, что вся теплота, переданная рабочему телу, превращена в работу. Не противоречит ли это известному нам второму закону термодинамики, гласящему, что периодически работающий тепловой двигатель не может всю подведенную к нему теплоту превратить в работу? Нет, не противоречит, потому что для осуществления цикла с $Q_2 = 0$

необходимо иметь холодильник с температурой, равной абсолютному нулю, что невозможно.

Коэффициент полезного действия тепловых двигателей в период их возникновения составлял только тысячные доли от используемой теплоты, а в настоящее время у лучших двигателей доходит до 40%. У нашего же мотоцикла к.п.д. не превышает 15%.

Первое наше знакомство с циклом теплового двигателя показало целесообразность увеличения разности верхнего и нижнего температурных уровней источников теплоты. Чем выше в тепловых двигателях температурный перепад, т. е. разница между температурой T_1 «верхнего» источника и температурой T_2 «нижнего» источника, тем бóльшую работу может совершить тепловой двигатель. Поэтому в технике стремятся повышать температуру (а в паровых двигателях и давление) начального состояния рабочего тела.

Если первые теплосиловые установки XVIII в. работали с паром, имевшим при входе в двигатель температуру 100°С и давление 1 *атм*, то теперь передовая техника нашей страны имеет дело с температурой пара 600°С и давлением 150 *атм*, а в недалеком будущем начнут работать тепловые двигатели с температурой 650°С и давлением 300 *атм*.

С другой стороны, делается все, чтобы как можно сильнее понизить температуру T_2. Для этого чаще всего пользуются водяным охлаждением, используя естественные и сооружая искусственные водоемы или громадные башенные водоохладители.

Означают ли наши выводы о значении температур T_1 и T_2, что любой тепловой двигатель, работающий при одинаковых значениях T_1 и T_2, будет давать один и тот же эффект, иметь один и тот же к.п.д.? Нет, не означают. Подобно тому как между двумя уровнями падения воды можно соорудить и древнее водяное колесо, больше разбрызгивающее воду, чем полезно использующее ее, и современную гидравлическую турбину, где не пропадает даром энергия ни одной капли воды, так и в тепловых двигателях между двумя температурными источниками можно соорудить двигатели с разными к.п.д.

Ведь между точками *1* и *2* на рис. 8 можно провести бесконечное множество самых разнообразных кривых и получить такое же множество циклов, причем таких, которые путем разнообразных комбинаций нагревания, охлаждения, расширения и сжатия могут быть осуществлены в действительной машине. Коэффициенты полезного действия всех этих двигателей, работающих в условиях одного и того же температурного перепада, будут разными. И среди всех этих к.п.д. есть один, имеющий наибольшее значение и указывающий на наилучший способ превращения теплоты в механическую работу. Этот способ и соответствующий ему цикл были разработаны французским инженером Сади Карно еще в 1824 г. и получил в науке название «цикл Карно».

Этот цикл упрощенно представлен на рис. 9. Оказывается, для получения наивысшего к.п.д. в данном пределе между температурами T_1 и T_2 нужно провести цикл, состоящий из четырех отдельных процессов, два из которых прямые (*1—2* и *2—3*) и два обратные (*3—4* и *4—1*).

Процесс *1—2* проводится так, чтобы расширение с подводом теплоты Q_1 происходило бы при постоянной температуре, равной температуре верхнего источника T_1. При таком процессе, называемом изотермическим (равнотемпературным), температура рабочего тела остается постоянной, так же как и определяемая температурой тела его внутренняя энергия. По первому закону термодинамики, вся подведенная в изотермическом процессе теплота превращается в работу. Но для работы теплового двигателя одного процесса недостаточно. Нужен цикл, а для осуществления цикла периодически действующего теплового двигателя необходимо вернуться к первоначальному положению рабочего тела. Поэтому в точке *2* изотермический процесс прекращают, прекращают подвод теплоты от «верхнего» источника и предоставляют рабочему телу расширяться до точки *3* изолированно, без подвода и отвода теплоты. Такой процесс называется адиабатическим, и получающаяся здесь работа производится только за счет внутренней энергии рабочего тела.

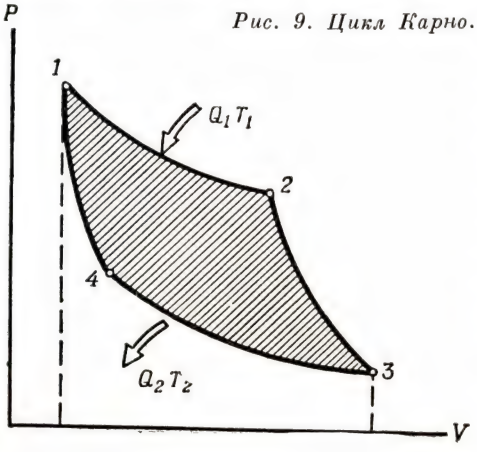


Рис. 9. Цикл Карно.

Далее идут обратные процессы. Первый из них, *3—4*, проводится изотермически.

при постоянной температуре «нижнего» источника T_2. Так как температура постоянна, то отданная нижнему источнику теплота Q_2 соответствует работе, совершенной по сжатию рабочего тела. Затем сжатие тела продолжается изолированно (адиабатически) на участке *4—1*. Теперь работа по сжатию тела идет на повышение температуры и, следовательно, увеличение внутренней энергии рабочего тела с таким расчетом, чтобы температура тела достигла своего первоначального значения, соответствующего точке *1*.

Таков цикл Карно, дающий наивысший эффект. Однако в реальных тепловых двигателях существует ряд условий, таких, как свойства рабочих тел, теплообмен между стенками цилиндра и рабочим телом, наличие работы против сил трения и т. д., которые делают более удобными другие циклы. Но для определения их эффективности неизменно служит цикл Карно.

Цикл Карно имеет еще одно большое преимущество: он дает возможность выразить к.п.д. теплового двигателя через температуру верхнего и нижнего источников теплоты. Так как в цикле Карно подвод и отвод теплоты производятся при постоянных температурах T_1 и T_2, то для него формула к.п.д., данная ранее, может быть выражена следующим образом:

$$\frac{T_1 - T_2}{T_1}.$$

Из этой формулы отчетливо видна выгодность повышения T_1 и понижения T_2, отмеченная нами ранее. Так же отчетливо видны и естественные пределы к.п.д. теплового двигателя. Он не может быть равен единице, так как это потребовало бы, чтобы температура T_2 была равна абсолютному нулю, что невозможно. Далее, если $T_1 = T_2$, то к.п.д. равен нулю, что подтверждает второй закон термодинамики, говорящий о невозможности получить работу при наличии только одной температуры.

Осуществление теплового цикла на практике в миллионах тепловых двигателей — дело сложное и относится к области техники. Но несколько общих положений об осуществлении теплового цикла следует высказать сейчас. Преобразование теплоты в работу осуществляется в так называемых теплосиловых установках, к которым относятся и мощные установки электрических станций, и транспортные установки — от тех, что движут океанские суда, до тех, которыми приводят в движение мотороллер. Во всех этих установках можно выделить отдельные части, предназначенные для осуществления соответствующих процессов теплового цикла.

На рис. 10 представлена схема паросиловой установки. Так называется тепловая установка, где рабочим телом является водяной пар. Паросиловые установки представляют собой основу мощных современных тепловых электростанций.

В самом простом случае паросиловая установка состоит из парового котла с пароперегревателем, парового двигателя (паровой машины или турбины), конденсатора-холодильника, охлаждающего устройства, конденсатного бака, питательного, конденсатного и циркуляционного насосов, т. е. из девяти отдельных сложных устройств. Современная мощная паросиловая установка сооружается в виде так называемого «блока», состоящего в основном из котла, паровой турбины и генератора электрического тока.

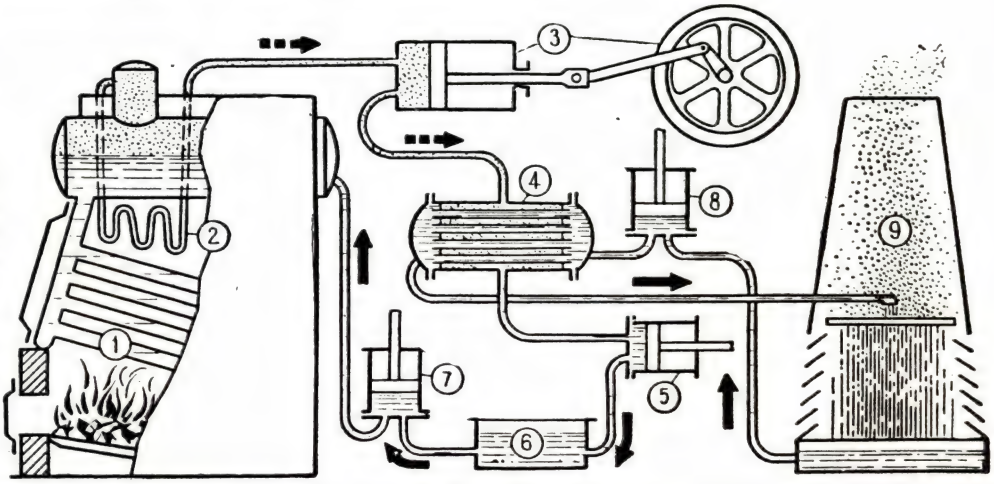


Рис. 10. Схема теплосиловой установки (ТСУ).

Пар получается в паровом котле 1 и перегревается в пароперегревателе 2; отработав в двигателе 3, пар конденсируется в конденсаторе-холодильнике 4. Конденсатный насос 5 направляет конденсат в конденсатный бак 6, откуда он питательным насосом высокого давления 7 подается в котел, завершая цикл изменений состояния рабочего тела. Источником охлаждения служит вода, прогоняемая циркуляционным насосом 8 через трубки конденсатора-холодильника. В охлаждающем устройстве 9 нагревшаяся вода отдает свое тепло атмосферному воздуху и снова подается в конденсатор.

Рассмотрим теперь так называемый обратный цикл. Он отличается от рассмотренных выше прямых циклов тем, что у него (рис. 11) прямой процесс (двойная линия) — процесс расширения рабочего тела — расположен ниже, чем обратный процесс, т. е. процесс сжатия (сплошная линия). Если теперь сопоставить

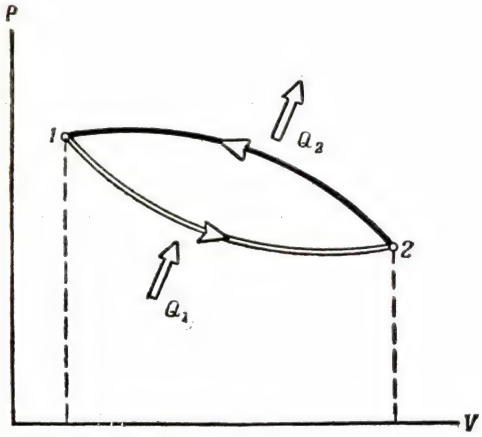


Рис. 11. Цикл холодильной установки.

площади, соответствующие работе, как мы это делали для прямого цикла (рис. 8), то получится, что площадь, расположенная между линиями прямого и обратного процессов, теперь будет изображать не совершенную телом, а совершенную над телом работу. Зачем же это делать? А разве никогда не возникает необходимость совершить работу для того, чтобы поднять воду, разве не строят водяные насосы? Также и в теплотехнике возникает необходимость решения обратной задачи, задачи подъема.

Чего? Теплоты. Куда? Туда, куда она сама собой в природе никогда не движется — от низких температур к более высоким, — подобно тому, как вода не течет снизу вверх. Это необходимо для охлаждения тел.

Вы установили холодильник и включили его. Внутри него температура понижается. Куда же уходит из него тепло? Наружу, больше некуда. Но снаружи температура выше, чем в холодильнике. Значит, теплота идет от тела с низкой температурой к телу с более высокой, чего в природе никогда не наблюдается. Это не значит, что наш холодильник нарушает законы природы. Подобно насосу, поднимающему воду вверх, мы в холодильнике совершаем работу, передаем теплоту от более холодного тела более горячему. Так осуществляется обратный цикл, при котором двигатель превращается в «тепловой насос».

Обратный цикл, как и прямой, осуществляется в нескольких отдельных частях (рис. 12).

Рабочим телом холодильных установок является так называемый хладагент — вещество, кипящее при температуре ниже нуля градусов. Когда такое вещество испаряется в испарителе холодильной установки, теплота из камеры хранения продуктов направляется через стенки трубок к хладагенту, поддерживая процесс испарения. Но как передать теплоту окружающей среде (воде, воздуху), если температура нагретого хладагента гораздо ниже температуры среды? Для этого хладагент направляют в компрессор и сильно сжимают. От сжатия температура хладагента повышается, и теперь становится возможным передать теплоту охлаждающей воде, протекающей по трубкам конденсатора, называемого так потому, что сжатый хладагент, отдавая теплоту воде, переходит в жидкое состояние, конденсируется. Как теперь понизить температуру хладагента настолько, чтобы она снова стала ниже, чем температура в камере хранения продуктов? Для этого хладагент подвергают процессу расширения в так называемом регулирующем клапане, где хладагент через узкое отверстие попадает в большой объем трубок испарителя. Объем увеличивается, давление и температура падают. Цикл закончен. Он повторяется снова и снова, и с каждым циклом хладагент, подгоняемый работой компрессора, переносит теплоту от камеры хранения к воде, охлаждающей конденсатор. В комнатных холодильниках охлаждающей средой служит воздух, которому передается теплота, «выкачанная» компрессором из камеры холодильника.

Законы термодинамики управляют не только работой тепловых двигателей и холодильных установок. Термодинамические процессы громадных масштабов непрерывно осуществляются на нашей планете, представляющей собой своеобразную теплосиловую установку.

Атмосферный воздух — первое рабочее тело Земли — получает теплоту от Солнца в виде излучения. Нагреваясь, это рабочее тело расширяется, и мы видим работу расширения в виде движения громадных масс воздуха — ветра. Подобно тому, как разность давлений над и под поршнем теплового двигателя перемещает поршень, разность давлений в отдельных частях атмосферы, вызываемая тепловым расширением под влиянием солнечного излучения, перемещает

громадный «поршень» в виде больших воздушных масс. Колесам ветровых двигателей остается только получить готовую механическую энергию движения воздуха, выработанную в атмосфере, как в гигантском тепловом двигателе.

Второе рабочее тело Земли — вода — осуществляет цикл парового теплового двигателя. Воспринимая теплоту солнечного излучения, вода испаряется, многократно увеличивая свой объем. Движимые воздушными течениями, вызванными, как мы видели, лучами Солнца, пары воды в виде облаков достигают «холодильников» (участков атмосферы, меньше нагретых Солнцем), отдают свою теплоту воздуху, конденсируются и в виде дождя падают на землю. Текут реки, и построенные на них гидравлические установки, как и ветряные мельницы, берут от природы уже готовую механическую энергию движения, выработанную в земной атмосфере. Миллиарды лет безостановочно работает грандиозный тепловой «двигатель», где Солнце — «верхний» температурный, а Земля — «нижний» температурный источники теплоты, а атмосферный воздух и вода океанов и морей — рабочие тела. Сложны и многообразны процессы, протекающие в этом «двигателе», но они подчинены законам термодинамики, обязательным для них так же, как и для крохотного бензинового моторчика хрупкой модели самолета.

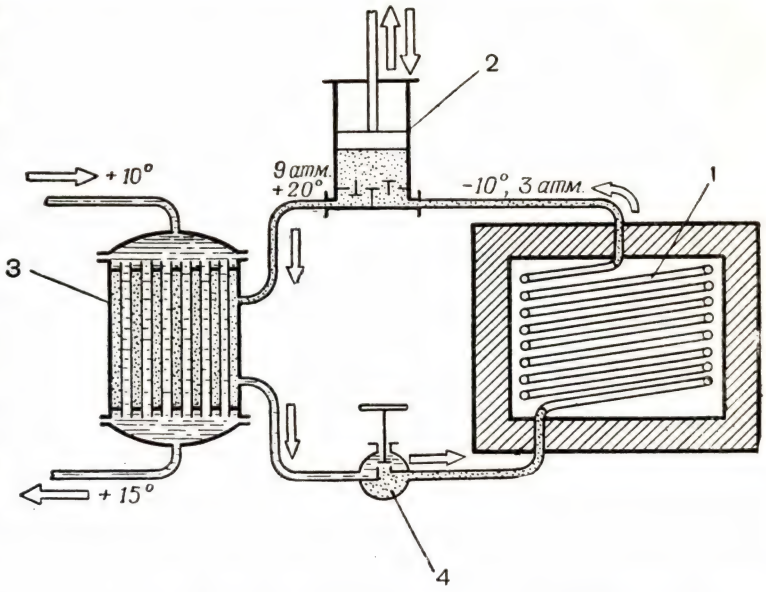


Рис. 12. Схема холодильной установки: 1 — испаритель, размещенный в холодильной камере, окруженной слоем изоляции; 2 — компрессор, в котором за счет сжатия повышаются давление и температура хладагента; 3 — конденсатор, в котором хладагент отдает тепло циркулирующей воде, несколько повышая ее температуру; 4 — регулирующий вентиль, за которым хладагент расширяется и температура его опять падает.

Сначала человек в своей практической деятельности использовал эти законы, зная лишь немногие из их внешних проявлений. Сжигая уголь в топках первых паровых машин, он ничего не знал о первом законе термодинамики, устанавливающем точное количественное соотношение между сгоревшим углем и полученной работой. Охлаждая холодной водой пар в паровых цилиндрах, он и не подозревал о наличии второго закона термодинамики, устанавливающего необходимость охлаждения в процессе получения работы за счет теплоты.

В наши дни, когда многое уже познано, ученые многих стран ведут дальнейшую систематическую работу над всесторонним исследованием тепловых явлений для того, чтобы обеспечивать постоянный прогресс теплоэнергетики.

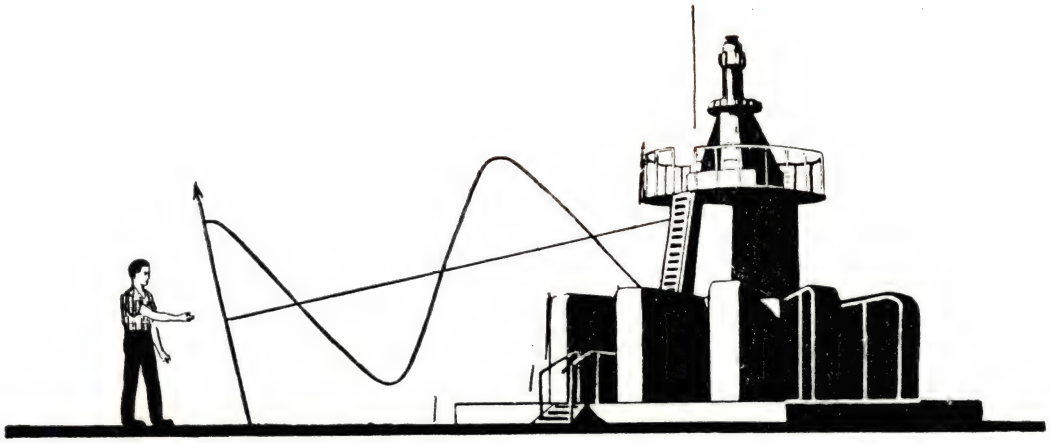
Одни ученые занимаются разработкой новых, наиболее эффективных практических термодинамических циклов для различных теплосиловых установок: для паровых установок мощных тепловых электростанций, предназначенных работать с паром, давление которого превосходит 300 *атм*, а температура 650°С; для газовых турбин, вращающих пропеллеры мощных вертолетов «МИ-6» и гигантских воздушных кораблей «ТУ-114»; для разнообразных двигателей внутреннего сгорания, количество которых на земном шаре уже превысило сто миллионов! А при таком развитии теплоэнергетики каждый процент экономии, достигнутый за счет усовершенствования термодинамического цикла, даст свыше 20 млрд. *квт·ч* годовой экономии.

Другие ученые разрабатывают точные уравнения состояния для реальных рабочих тел. Они могут быть получены путем расчетов, для чего необходимо очень глубоко и ясно предусмотреть, оценить и описать точным математическим языком сложнейшую картину взаимодействий между молекулами. Из многих уравнений состояния, предлагавшихся учеными, наибольшей точностью отличается получившее мировое признание уравнение лауреата Ленинской премии проф. М. П. Вукаловича.

Большое число ученых занято экспериментальным исследованием свойств реальных

рабочих тел. Они находят не только известные нам параметры P, v и T и связь между ними, но и многие другие свойства, без знания которых невозможен прогресс теплоэнергетики. Так, например, не зная вязкости и теплопроводности рабочих тел, невозможно рассчитать ни их движение через километры трубок и тысячи лопаток, ни передачу миллиардов калорий тепла в котлах, конденсаторах, перегревателях, испарителях.

Свойства рабочих тел теплосиловых и холодильных установок исследуются в Энергетическом институте АН СССР им. акад. Г. М. Кржижановского (ЭНИН), во Всесоюзном теплотехническом институте им. Ф. Э. Дзержинского (ВТИ), в Центральном котлотурбинном институте им. И. И. Ползунова (ЦКТИ), в Московском ордена Ленина энергетическом институте (МЭИ) и ряде других научных учреждений. В МЭИ, кроме того, готовятся кадры инженеров-теплофизиков для исследовательской работы. Многие из работ советских ученых-теплоэнергетиков получили мировое признание.



Электромагнитные явления

ЭЛЕКТРИЧЕСТВО И МАГНЕТИЗМ

Все окружающие нас предметы, растения, животные, несмотря на крайнее разнообразие, построены примерно лишь из 90 видов мельчайших частиц — атомов. Это замечательное единство природы простирается еще дальше. Все атомы, в свою очередь, построены из еще более мелких частиц, называемых элементарными. Число их видов еще меньше. В состав атома, в основном, входят электроны, протоны и нейтроны.

Элементарные частицы оказывают друг на друга определенные воздействия. Существование определенных сил между элементарными частицами приводит к тому, что они объединяются в более или менее сложные системы — атомы различных видов. И, наконец, эти же силы взаимодействия вызывают сцепление атомов друг с другом в веществах.

Несмотря на удивительное разнообразие воздействий тел друг на друга в безграничных просторах Вселенной, на нашей планете в любом куске вещества, в живых организмах, в том числе и в организме человека, в атомах и, наконец, в атомных ядрах мы всегда встречаемся с проявлением сил тяготения, электрических, магнитных и ядерных.

Учение об электричестве и магнетизме охватывает всю громадную совокупность явлений природы, для течения которых основную роль играют электромагнитные силы. Трудно, почти невозможно указать явление, не связанное с действием электромагнитных сил. Поэтому изучение их имеет важнейшее значение.

Силы всемирного тяготения играют решающую роль только в том случае, когда во взаимодействии участвуют тела космических масштабов. Эти силы управляют движением звезд, поддерживают стройный порядок в нашей солнечной системе. Они же вызывают притяжение всех тел на Земле к ее центру. При взаимодействии элементарных частиц, атомов, молекул, небольших масс вещества силы тяготения совершенно ничтожны, ими вполне можно пренебречь.

Ядерные силы обеспечивают устойчивость атомного ядра. Посредством этих сил протоны и нейтроны объединяются в атомные ядра. С расстоянием ядерные силы очень быстро убывают. Вне атомного ядра они практически не сказываются.

Электромагнитным силам в природе принадлежит необычайно широкая «арена деятельности».

Ими определяется строение атома: электроны, обращающиеся вокруг атомного ядра, удерживаются около него благодаря действию электрических сил. Электромагнитные силы действуют и между отдельными атомами и молекулами. Силы, вызывающие объединение атомов в молекулы,— химические силы — также имеют электромагнитную природу. Таково же происхождение сил сцепления между атомами и молекулами, приводящих к образованию различных веществ. Правда, в этих случаях силы взаимодействия тоже довольно быстро убывают с расстоянием. На расстояниях, превышающих размеры атома в десять раз, они уже почти не сказываются.

В атомном ядре между протонами (положительно заряженными частицами) действуют мощные силы электрического отталкивания. Именно они сообщают частицам большие скорости при разрушении ядер в реакторах атомной электростанции и при взрыве атомной бомбы.

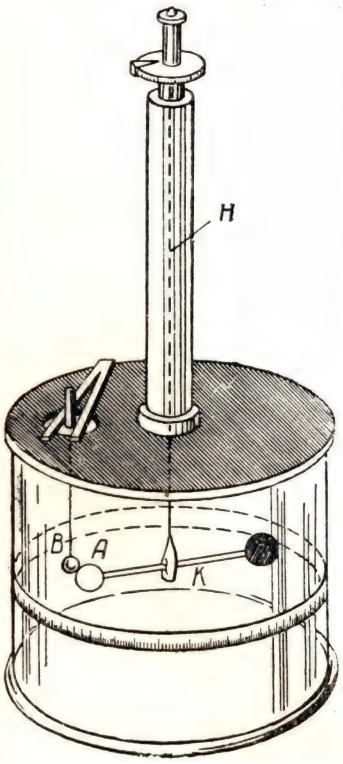


Рис. 1. Крутильные весы Кулона.

Наконец, к электромагнитным явлениям относятся свет, тепловое излучение и радиоволны.

В повседневной жизни и в технике мы на каждом шагу встречаемся с различными проявлениями электромагнитных сил.

Действительно, с какими силами мы имеем дело? В первую очередь это силы упругости. Благодаря силам упругости твердые тела сохраняют свою форму, а жидкие — свой объем. Эти же силы препятствуют уменьшению объема газа. Далее, силы трения и вязкости, которые тормозят движение тел, жидкостей и газов. Наконец, сила наших мышц. Все эти силы, несмотря на все свое различие, имеют общую электромагнитную природу.

Общеизвестно и широчайшее применение электромагнитных явлений в технике: электрическое освещение, связь, электродвигатели, сложнейшие радиотехнические устройства, быстродействующие вычислительные машины и т. д. Наш век — это век электричества.

Почему электромагнитные силы так широко распространены? Почему они столь разнообразны? Прежде всего дело в том, что все атомы в основном построены из электрически заряженных частиц: электронов и протонов. С другой стороны, эти силы гораздо значительнее сил тяготения и действуют на гораздо бо́льших расстояниях, чем ядерные. Например, в атоме водорода электрическая сила взаимодействия между электроном и ядром в 10^{42} раз больше силы тяготения между ними.

Разнообразие проявлений электромагнитных сил определяется фактом существования электрических зарядов двух типов: положительных и отрицательных. Отрицательный заряд несут на себе в основном легкие элементарные частицы — электроны, а положительный — в 1836 раз более тяжелые протоны. Величина электромагнитных сил зависит не только от расстояния между зарядами, как у сил тяготения, но и от состояния их движения, в частности от скорости. В этом заключается еще одна важная причина разнообразия в проявлении этих сил.

Все электромагнитные явления можно объяснить действием сравнительно немногих общих законов.

Теперь наш рассказ пойдет о самом главном. Что представляют собой основные законы электромагнитных явлений? Как удалось их открыть? Как с их помощью ученые объясняют

различные явления природы? Как используют их для практических целей?

Сотни томов посвящены исследованию электромагнитных явлений, и еще сотни будут написаны. Поэтому не удивительно, что многое в нашем кратком рассказе останется незатронутым.

РОЖДЕНИЕ НАУКИ

Мы не знаем, когда люди впервые обнаружили, что тела могут быть приведены в особое состояние — наэлектризованы. Произошло это очень давно. Впервые в VI в. до н. э. описал этот факт греческий философ Фалес Милетский. По словам ученого, ткачихи заметили способность янтаря, потертого о шерсть, притягивать к себе легкие предметы, не соприкасаясь с ними.

Оказывается, подобным свойством обладает не только янтарь. Если провести несколько раз гребенкой по сухим волосам, то она начнет притягивать мелкие кусочки бумаги. Тела, приведенные в такое состояние, называют наэлектризованными.

В этих простейших опытах люди впервые столкнулись с явным проявлением электрических сил. Но прошло более двух тысячелетий, прежде чем началось систематическое исследование электричества и был открыт закон взаимодействия наэлектризованных тел. Странное поведение янтаря и некоторых других предметов казалось любопытным курьезом. Ничто не говорило о том, что здесь в простейшей форме выступают законы, управляющие течением большинства явлений на Земле.

Сейчас мы хорошо знаем, что происходит при электризации тела. Наиболее подвижные заряженные частицы — электроны — при трении переходят с одного тела на другое. Тело, получающее избыток электронов, заряжается отрицательно, а потерявшее электроны — положительно. Закон взаимодействия заряженных тел, покоящихся относительно друг друга, был установлен Кулоном в конце XVIII в.

Очевидно, что нельзя дать общий закон взаимодействия для заряженных тел произвольных размеров и формы, так как сила взаимодействия зависит от формы и взаимного расположения тел. Размеры же тел и их взаимное расположение могут быть бесконечно разнообразными. Однако опыт показывает, что если размеры заряженных тел много меньше расстояния между ними, то сила взаимодействия не будет зависеть от формы и размера заряженных тел. Именно для этого случая и был установлен закон, имеющий общее значение.

Для исследования взаимодействия зарядов Кулоном был сконструирован специальный прибор — крутильные весы, изображенные на рис. 1. С помощью этого прибора можно исследовать взаимодействие маленьких заряженных шариков A и B. Шарик B закреплен неподвижно, а шарик A с помощью коромысла K подвешен на длинной упругой нити H. Закручивая эту нить вращением головки прибора, можно уменьшать расстояние между шариками, а по углу закручивания нити судить о величине силы взаимодействия шариков. В результате этих опытов Кулон нашел, что сила электрического взаимодействия убывает обратно пропорционально квадрату расстояния, т.е. уменьшается, скажем, в четыре раза при увеличении расстояния вдвое. Кроме того, эта сила зависит от величины зарядов шариков. Это можно установить так. Коснемся шарика B (или A) другим, незаряженным шариком тех же размеров. Тогда заряды распределятся поровну и, следовательно, заряд шарика B уменьшится вдвое. Опыт показывает, что и сила взаимодействия уменьшается вдвое. Повторяя подобный прием, можно убедиться, что сила пропорциональна произведению зарядов.

ЭЛЕКТРИЧЕСКОЕ ПОЛЕ

Как же осуществляется взаимодействие двух зарядов? Первоначально полагали, что заряды непосредственно через пустоту действуют друг на друга. Каждый заряд на расстоянии «чувствует» присутствие другого. Это была так называемая «теория дальнодействия».

На рис. 2 изображены два заряда. Если переместить заряд B, то сила, действующая на заряд A, изменится, хотя никаких изменений с зарядом A и окружающим его пространством не произошло. Такое представление явно неудовлетворительно. Изменение силы с точки зрения «теории дальнодействия», можно воспринять только как «чудо». Правда, «чудо», подчиняющееся определенному количественному закону.

Рис. 2. Схема взаимодействия электрических зарядов по «теории дальнодействия». Между зарядами ничего нет.

Величайшей заслугой английского физика Майкла Фарадея — основоположника современных представлений об электромагнетизме—было

то, что он ввел совершенно новое понятие — понятие электрического поля. Согласно его идее, заряды не действуют друг на друга непосредственно. Каждый из них создает в окружающем пространстве электрическое поле. Величина электрического поля убывает по мере удаления от заряда. На заряд *A* действует не сам заряд *B*,

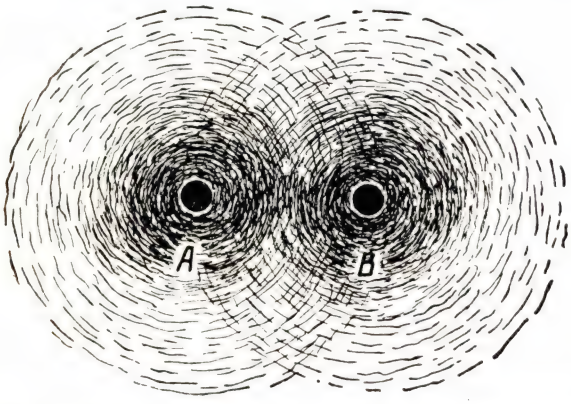


Рис. 3. Схема взаимодействия электрических зарядов по «теории близкодействия». Заряды создают вокруг себя электрическое поле.

а созданное им поле (рис. 3). Теперь не удивительно, что перемещение заряда *B* в новое положение меняет силу, действующую на заряд *A*. Ведь при этом меняется поле заряда *B* в той точке, где расположен заряд *A*. Действие заряда передается в пространстве от точки к точке посредством электрического поля. В этом заключается «теория близкодействия». С ее появлением «теория дальнодействия» была оставлена.

Что же такое электрическое поле? Его существование в пространстве столь же достоверно, сколь и существование самих зарядов. Электрическое поле представляет собой особое, специфическое состояние материи. Мы не можем разъяснить, что такое поле, не рассказав, из чего оно состоит: ничего более простого, чем электрическое поле, мы не знаем, подобно тому как мы не знаем ничего более простого, чем элементарные частицы.

Наше представление о том, что́ такое электрическое поле, образуется в результате опытного исследования свойств поля. Основное его свойство заключается в способности действовать на электрический заряд с определенной силой. По величине этой силы можно судить о величине поля. Помещая один и тот же электрический заряд в различные участки электрического поля, мы замечаем, что сила, действующая на него, будет меняться. Следовательно, величина поля в различных точках пространства будет различной. Принято характеризовать величину поля силой действующей на положительный заряд, равный единице. Эта характеристика поля называется напряженностью электрического поля. Распределение электрического поля в пространстве можно считать известным, если мы знаем напряженность поля в каждой точке.

В учении об электричестве понятие поля играет основную роль. После введения представления о поле центр тяжести в исследовании электромагнитных процессов сосредоточивается уже не на изучении самих зарядов, а на изучении свойств пространства между ними, заполненного электрическим полем. В каждой точке пространства поле действует на положительный заряд с некоторой силой, имеющей определенное направление. Это направление принимается за направление поля. Силовой линией называется линия, касательная к которой в каждой точке указывает направление поля (рис. 4).

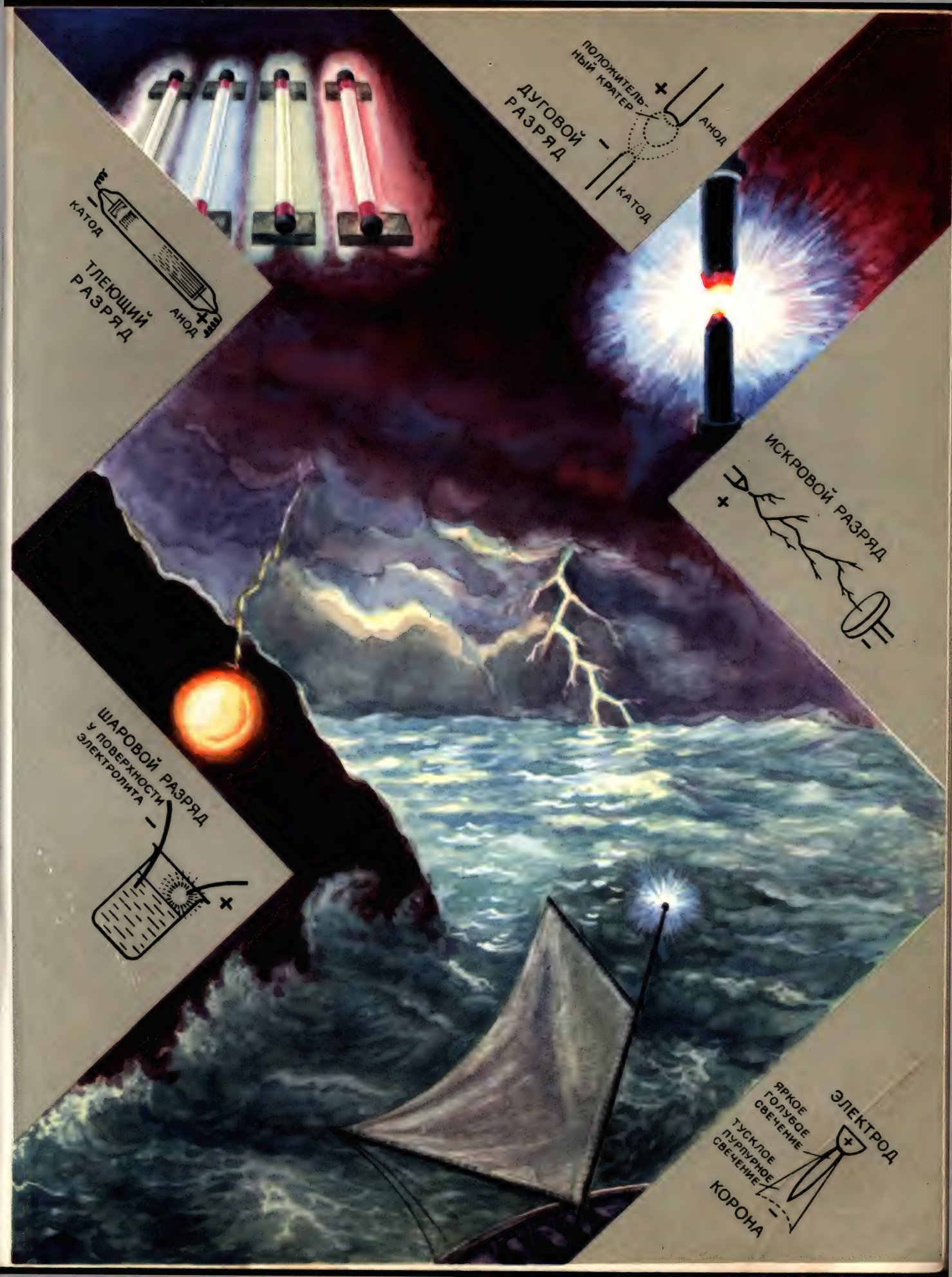
Рис. 4. Силовая линия электрического поля.

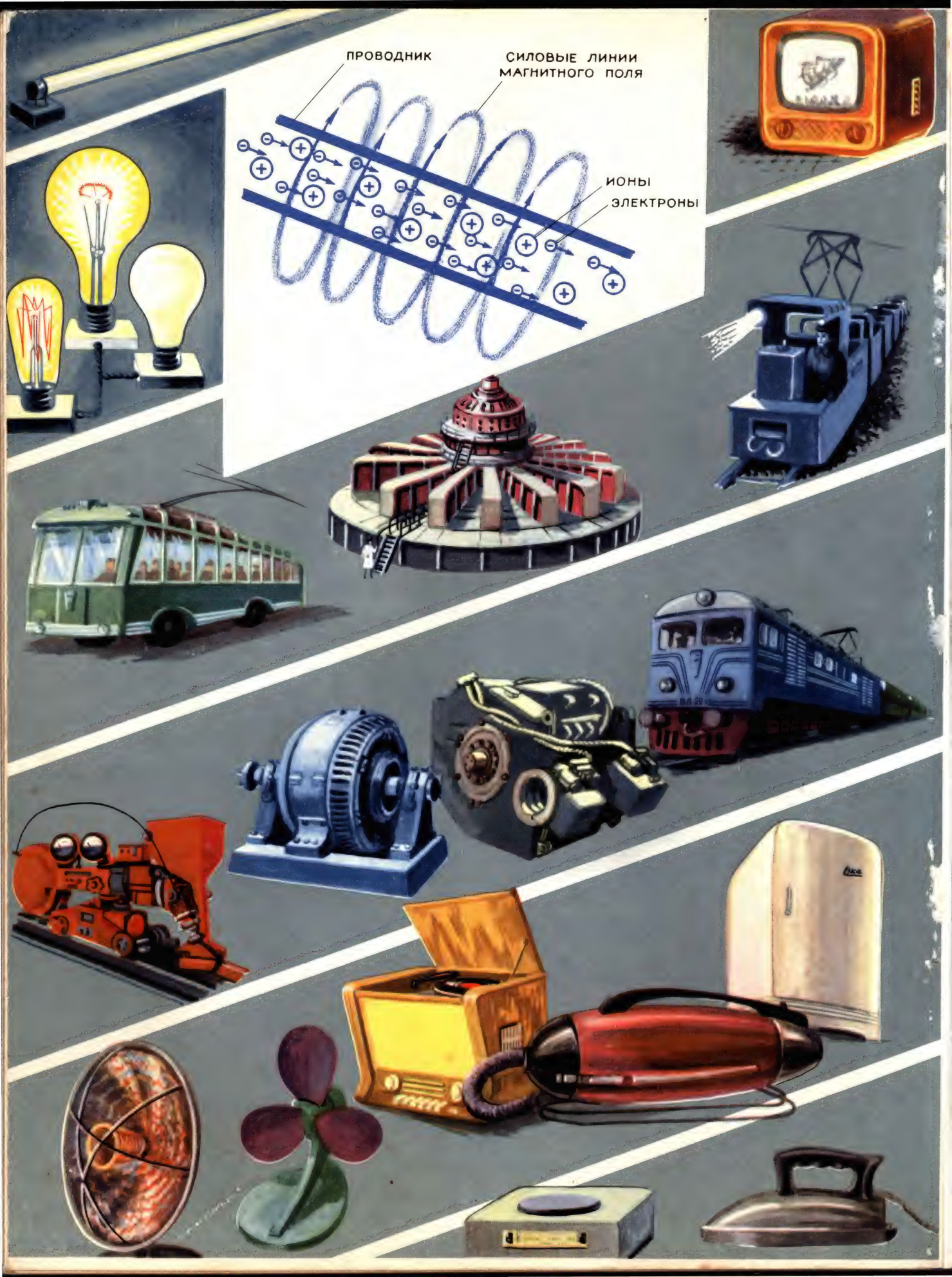
Электрическое поле непосредственно не действует на наши органы чувств. С этим, кстати, связаны некоторые затруднения при введении представлений о поле: ведь нелегко убедиться в реальности того, что мы непосредственно не ощущаем.

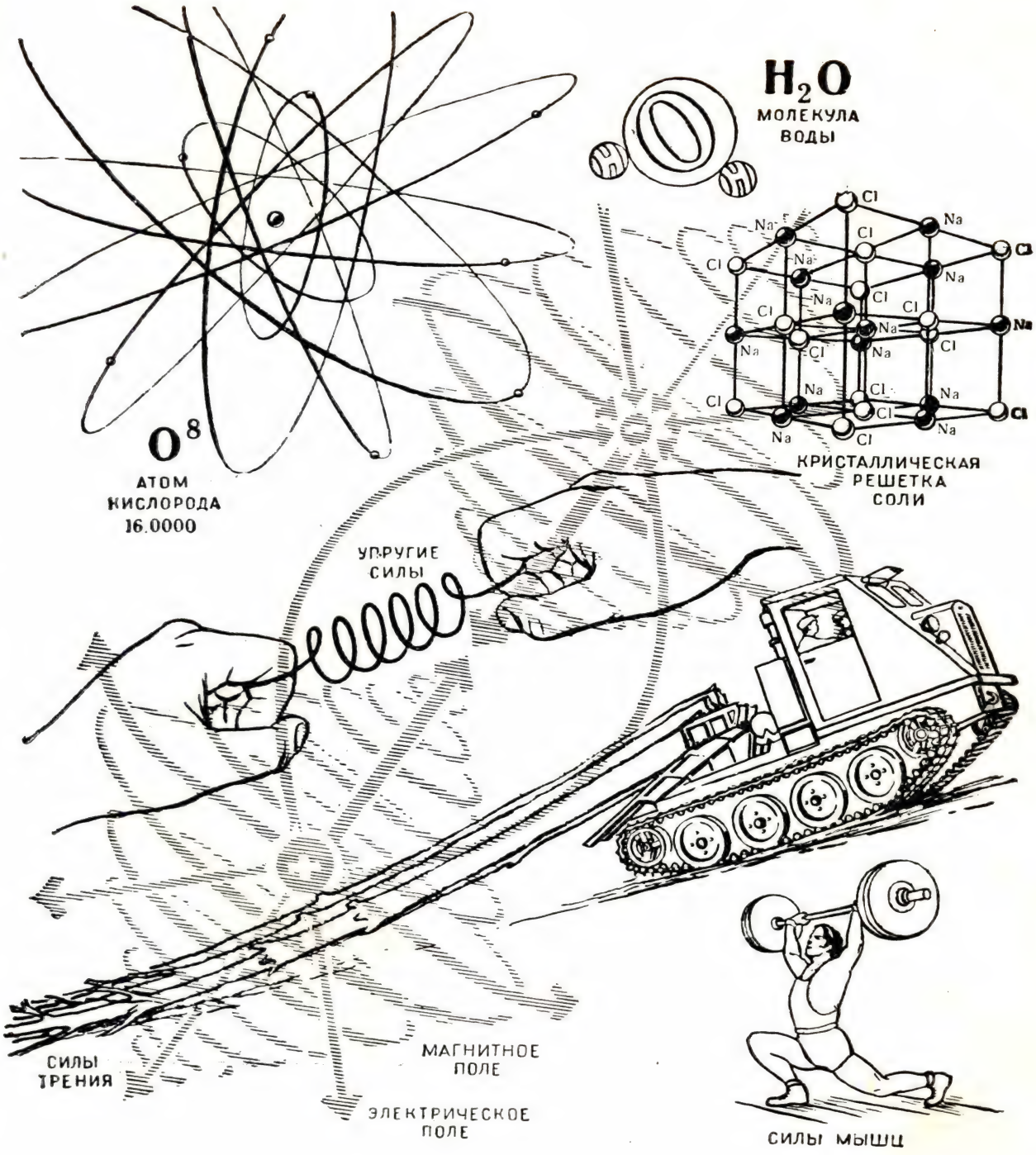
Однако с помощью не очень сложного опыта мы можем сделать силовые линии «видимыми». Дело в том, что твердые продолговатые частицы гипса или другого не проводящего электричество вещества поворачиваются вдоль поля, располагаясь как раз по силовым линиям.

Для полного успеха опыта нужно располагать электрической машиной, способной

Таблица 21. Различные виды электрических разрядов. Наверху слева показан тлеющий разряд в трубках, покрытых светящимся составом; наверху справа — дуговой разряд; в центре — гигантский искровой разряд — молния; левее — шаровая молния; внизу — коронный разряд, возникший на верхушке мачты.


ДУГОВОЙ РАЗРЯД
ПОЛОЖИТЕЛЬНЫЙ КРАТЕР
АНОД
КАТОД
ТЛЕЮЩИЙ РАЗРЯД
КАТОД
АНОД
ИСКРОВОЙ РАЗРЯД
ШАРОВОЙ РАЗРЯД
У ПОВЕРХНОСТИ ЭЛЕКТРОЛИТА
ЭЛЕКТРОД
ЯРКОЕ ГОЛУБОЕ СВЕЧЕНИЕ
ТУСКЛОЕ ПУРПУРНОЕ СВЕЧЕНИЕ
КОРОНА


ПРОВОДНИК
СИЛОВЫЕ ЛИНИИ МАГНИТНОГО ПОЛЯ
ИОНЫ
ЭЛЕКТРОНЫ



Большая часть сил, с которыми мы встречаемся, имеет электромагнитную природу.

Таблица 22. Различные виды электрических машин и приборов. В середине верхней части рисунка схема магнитного поля, возникающего вокруг проводника, по которому течет электрический ток.

сообщить телам достаточно большой заряд. Чтобы силы трения не мешали частицам поворачиваться вдоль поля, их нужно поместить в жидкий изолятор, например в касторовое масло. Полная схема опыта изображена на рис. 5. Тела *а* и *б*, между которыми изучается поле, расположены в ванночке с прозрачным дном. Возникающая в ванночке (*В*) картина распреде-

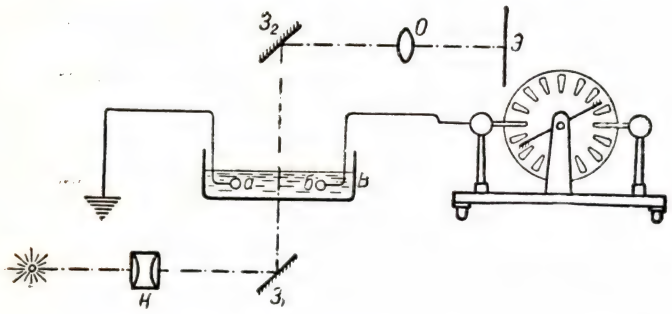


Рис. 5. Схема опыта для получения картины силовых линий электрического поля.

ления силовых линий проектируется на экран (*Э*) с помощью объектива (*О*), двух зеркал ($З_1$ и $З_2$) и конденсера (*К*). На рис. 6 показано несколько примеров распределения силовых линий, полученных указанным способом.

Интересно, что электрически нейтральная в целом система из двух зарядов противоположных знаков создает в окружающем пространстве электрическое поле. Правда, в этом случае поле в основном сосредоточено между зарядами. Вне пространства между зарядами электрические силы сказываются слабо. Если при этом геометрические размеры зарядов значительно меньше расстояния между ними, то такая система называется электрическим диполем.

Постоянное электрическое поле обладает одним важным свойством, позволяющим ввести еще одну величину, которая характеризует поле наряду с напряженностью.

Работа, которую совершают силы электрического поля при перемещении заряда из одной точки пространства в другую, не зависит от формы выбранного пути (рис. 7). Такие поля называются потенциальными. Потенциальным является поле тяготения Земли. Работа, которую надо совершить, чтобы поднять тело над Землей, не зависит от формы пути подъема, а определяется только начальным и конечным положением тела над Землей — высотой подъема. Следовательно, в электрическом поле работа при перемещении данного

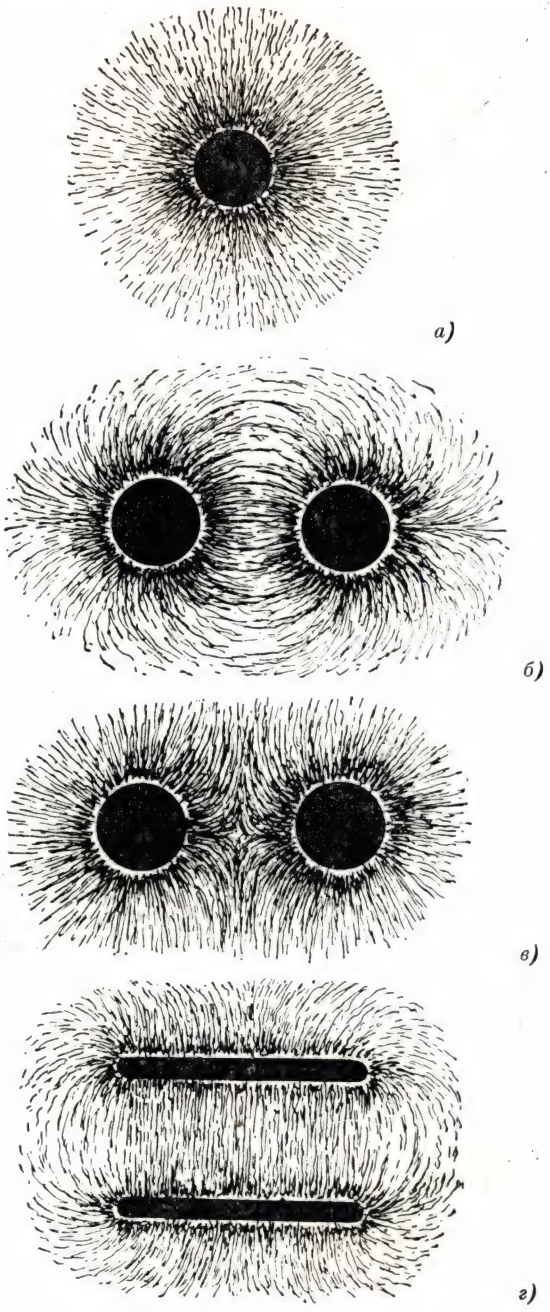


Рис. 6. Картины распределения силовых линий электрического поля: а) заряженный шар; б) разноименно заряженные шары; в) одноименно заряженные шары; г) конденсатор.

заряда целиком определяется характером поля и положением в пространстве начальной и конечной точек пути. В свою очередь электрическое поле вполне определено, если известна ра-

бота по перемещению единичного положительного заряда между двумя любыми точками в пространстве, занятом полем. Эта работа называется разностью потенциалов или напряжением (не путать с напряженностью!).

Итак, электрическое поле можно характеризовать двумя величинами: либо заданием напряженности в каждой точке пространства, либо работой по перемещению единичного заряда между двумя любыми точками — разностью потенциалов. Напряженность — функция одной точки пространства: новая величина — разность потенциалов — функция двух точек. Обе величины однозначно связаны друг с другом так же, как работа и сила в механике.

Возникает естественный вопрос: зачем вводить две характеристики поля, а не довольствоваться одной напряженностью? Тем более, что характеристика поля с помощью задания силы в каждой точке гораздо яснее и нагляднее.

Все дело в том, что многие электрические явления, а главным образом величина электрического тока в цепи, зависят не от напряженности поля в какой-либо одной точке, а именно от разности потенциалов между двумя точками, например на концах проводника в случае тока. При падении тела с некоторой высоты для оценки результатов падения важно знать не силу, действующую на тело в какой-либо точке, а работу, совершенную силой тяжести на пути падения. Точно так же для определения эффекта, который может вызвать электрическое поле, чаще всего нужно знать работу, которую оно может совершить при перемещении заряда, а не силу, действующую на него в некоторой точке поля. Правда, зная величину поля в каждой точке пространства, мы всегда можем вычислить работу по перемещению заряда, но знание разности потенциалов означает, что эта работа известна.

Вот почему понятие разности потенциалов (или напряжения) прочно вошло не только в науку и технику, но и в обиходную жизнь. Каждый из вас знает, что напряжение в сети городского тока является главной ее характеристикой. Это напряжение определяет текущий по электрической лампочке или по обмотке трансформатора телевизора ток и, следовательно, то количество энергии, которое поступает из сети.

ВЕЩЕСТВА В ЭЛЕКТРИЧЕСКОМ ПОЛЕ

В электрическом отношении все тела делятся на проводники и изоляторы (диэлектрики). Те и другие в обычном состоянии электрически нейтральны. Заряд, сообщенный изолятору, не перемещается по нему, оставаясь в том месте, куда он первоначально помещен. В проводнике же заряды могут свободно перемещаться под влиянием электрического поля. (В последнее время большое значение приобрели так называемые полупроводники, но здесь мы о них говорить не будем: им посвящена специальная статья).

Такое различие в поведении вызвано особенностями строения проводников и диэлектриков. Диэлектрики состоят из отдельных нейтральных атомов или молекул. Проводники (к ним относятся все металлы) построены иначе. Атомы металла, образуя кристаллическую решетку, теряют «внешние», более удаленные от ядра, и, следовательно, слабо с ним связанные электроны. Эти электроны перестают принадлежать определенным атомам и становятся «собственностью» всего куска металла в целом. Такие электроны называют «свободными», так как они могут перемещаться внутри металла. Атомы, лишенные части электронов и составляющие остов кристаллической решетки, называются ионами.

Рассмотрим, например, металл литий. Атом лития имеет положительно заряженное ядро, вокруг которого совершают сложные движения три электрона. Когда литий находится в твердом состоянии, то два электрона каждого атома продолжают обращаться вокруг ядра, а третий электрон может, оторвавшись от атома, перемещаться внутри металла. Наличие свободных электронов и определяет все особенности металлов: способность хорошо проводить электрический ток, большую теплопроводность и т. д.

Простой опыт позволяет выяснить, как при отсутствии электрического тока распределяется по проводнику сообщенный ему заряд. Для этого достаточно прикрепить к заряженной

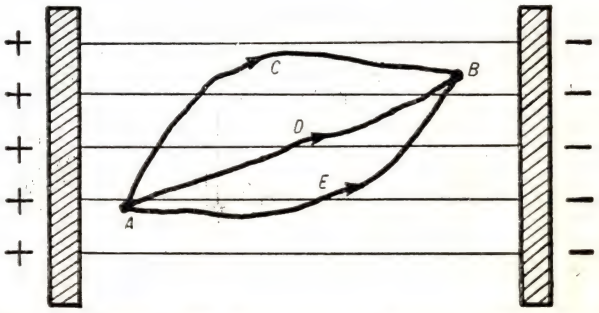


Рис. 7. Работа при перемещении заряда в постоянном электрическом поле не зависит от формы пути.

проволочной сетке, свернутой в виде цилиндра, тонкие полоски станиоля. Листочки, расположенные на внутренней поверхности сетки, останутся неподвижными, а прикрепленные к внешней поверхности — оттолкнутся от нее (рис. 8). Следовательно, электрический заряд имеется лишь на внешней поверхности сетки и заряжает только внешние листочки. Это и вызывает их отклонение на некоторый угол. На внутренней поверхности сетки, очевидно, зарядов нет. Этот факт является совершенно общим. Электрический заряд располагается на внешней поверхности проводника. Получить заряд на внутренней поверхности проводника при отсутствии токов в нем нельзя. Причину этого понять нетрудно. Одноименные заряды, отталкиваясь и стремясь как можно дальше уйти друг от друга, располагаются на внешней поверхности проводника.

Это правило справедливо независимо от того, какая причина вызывает появление заряда. Если поместить металлическое тело в постоянное (не меняющееся с течением времени) электрическое поле, на его поверхности возникают так называемые индукционные заряды, но внутри проводника заряд по-прежнему остается равным нулю. При этом и само электрическое поле не проникает внутрь проводника. Только в первый момент, при внесении проводника в поле, оно проникает внутрь металла и вызывает перемещение электронов навстречу полю. Левая

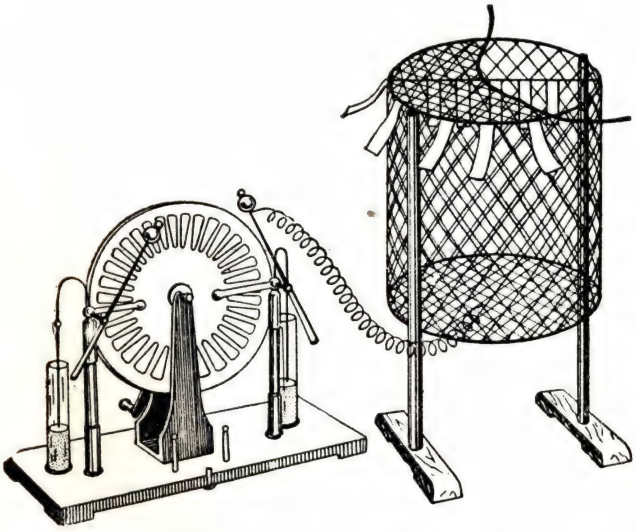


Рис. 8. Электрический заряд распределяется по поверхности проводника.

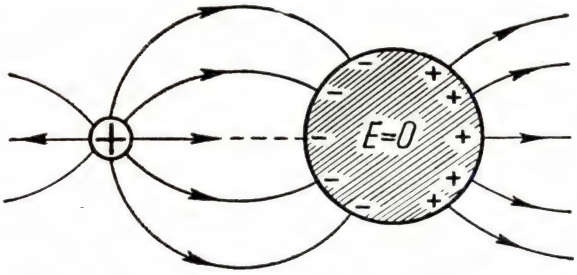


Рис. 9. Металлический шар в постоянном электрическом поле.

часть тела (рис. 9) заряжается при этом отрицательно, а правая — положительно. Заряды будут перемещаться до тех пор, пока не установится равновесие. Тогда ток прекратится. Происходит это крайне быстро. Если движения зарядов в проводнике нет, то, значит, в нем нет и электрического поля, иначе свободные электроны пришли бы в движение.

Одновременно можно заметить, что силовые линии электрического поля, обрываясь на поверхности металла, всегда перпендикулярны к ней. Поле вдоль поверхности равно нулю, так как токи на поверхности также отсутствуют.

Непроницаемость металлов для постоянного электрического поля широко используется для устройства так называемой электростатической защиты. Чтобы оградить чувствительные электрические приборы от влияния внешних случайных электрических полей, их помещают в металлические ящики.

Если проводник имеет форму шара, то заряды на нем располагаются равномерно по всей поверхности. Если же он имеет острые выступающие части, то заряды скопляются преимущественно на остриях. Возникающая при этом большая напряженность поля способна вызвать ряд любопытных явлений. Проводник начинает разряжаться. Заряды «стекают» с острия, вызывая заметное перемещение воздуха — «электрический ветер». Этот ветер может погасить пламя свечи на расстоянии нескольких сантиметров от острия.

Явление «стекания» электричества используется в молниеотводах — заземленных металлических стержнях, высоко поднятых над окружающими зданиями. Только при очень сильных грозах молния ударяет в молниеотвод, но при этом электрический заряд не приносит вреда — уходит в землю.

Посмотрим теперь, как влияет на взаимодействие заряженных тел диэлектрик. Для этого сначала с помощью крутильных весов измерим

силу взаимодействия между разноименно заряженными шариками *A* и *B*. Затем заполним стеклянный сосуд весов каким-либо жидким диэлектриком, например керосином. Никаких заметных на глаз изменений с диэлектриком не произойдет. Однако существующее между шариками электрическое поле совершает в нем работу. О ней можно судить по результатам. Расстояние между шариками увеличится, что говорит об уменьшении силы притяжения. Измерение покажет, что в керосине сила взаимодействия шариков в два раза меньше, чем в воздухе.

Почему это происходит? Поле проникает внутрь электрически нейтральных молекул керосина. Положительные заряды молекул смещаются вдоль поля, а отрицательные — против поля. Так как эти заряды связаны друг с другом значительными силами, то молекулы не разрываются, они лишь растягиваются вдоль силовых линий, превращаясь в системы, которые можно рассматривать как электрические диполи.

Возникающая картина схематически изображена на рис. 10. Посмотрите, как непрерывные цепочки диполей вытягиваются между зарядами! Диэлектрик, находящийся в таком состоянии, называется поляризованным. Особенно существенно, что отрицательно заряженные концы диполей сплошным покровом охватывают положительный заряд, а положительные концы диполей — отрицательный. Положительные и отрицательные концы диполей в керосине соприкасаются друг с другом, и их электрическое действие нейтрализуется. Но на поверхности шариков такой компенсации не происходит. Легко представить, к чему это приводит. Теперь поле создают не только сами шарики, но и «связанные» заряды концов диполей. Поле в диэлектрике, созданное одним из шариков, например *A*, ослабевает, так как заряд шарика *A* и «связанный» заряд на его поверхности имеют разные знаки и создают поля противоположного направления. Ясно, что уменьшается и сила, действующая на другой шарик (*B*).

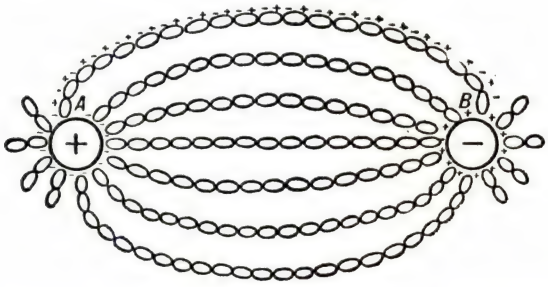


Рис. 10. В электрическом поле молекулы диэлектрика растягиваются и располагаются вдоль силовых линий.

Число, показывающее, во сколько раз уменьшается в данном диэлектрике поле, созданное зарядом, называется диэлектрической проницаемостью данного вещества. Диэлектрическая проницаемость характеризует электрические свойства диэлектрика. Различные диэлектрики имеют разные значения диэлектрической проницаемости. Так, диэлектрическая проницаемость воздуха близка к единице (1,00059), а воды — примерно в 80 раз больше. У некоторых диэлектриков, как например сегнетовая соль, диэлектрическая проницаемость очень велика, около 10 000. Подобные вещества называют сегнетоэлектриками. Они находят важное применение при изготовлении высокоэффективных электрических конденсаторов. Отметим еще, что у ряда диэлектриков, например у воды, молекулы и в отсутствие электрического поля представляют собой диполи. Поляризация таких диэлектриков состоит в простом повороте всех диполей вдоль электрического поля.

При помещении в электрическое поле поляризация диэлектрика обычно не сопровождается изменением его размеров. Однако у некоторых кристаллических веществ дело обстоит иначе. У сегнетовой соли, кварца и др. поляризация сопровождается механическими деформациями: сжатием или растяжением. И наоборот, если подвергать эти тела деформациям, то они поляризуются и на их поверхности выступают «связанные» электрические заряды. Это явление называется пьезоэлектрическим эффектом. Пьезоэлектрический эффект находит широкое практическое применение. Деформация кварца в переменном электрическом поле используется для получения ультразвука (см. статью «Звук и ультразвук»).

Поляризация диэлектрика под действием деформации используется для преобразования механических воздействий в электрические. На этом принципе устроен пьезоэлектрический звукосниматель электрического проигрывателя. Колебания иглы при движении по звуковой дорожке деформируют маленький кристалл и вызывают его поляризацию. Связанные заряды, выступающие на поверхности кристалла, создают переменные электрические поля, возбуждающие слабые электрические токи в подходящих к кристаллу проводниках звукоснимателя. Эти токи усиливаются и подаются в репродуктор.

На этом же принципе основаны точные методы измерения давлений.

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ТОК В МЕТАЛЛАХ

Электрическим током называется движение любых электрических зарядов. Перемещение зарядов в каком-либо веществе всегда встречает сопротивление и требует совершения работы. Поэтому для получения электрического тока в замкнутой цепи необходим прежде всего источник, за счет энергии которого совершалась бы работа по перемещению зарядов. Таким источником, например, может служить гальванический элемент, аккумулятор, генератор электрического тока. Судить о прохождении электрических зарядов можно лишь по тем явлениям, которые сопровождают электрический ток. Так, при пропускании электрического тока по проволоке она накаляется. При прохождении тока через растворы на электродах происходит выделение вещества. Наконец, что чрезвычайно существенно, при прохождении электрического тока по проводнику вокруг него всегда возникает магнитное поле, которое можно обнаружить по отклонению магнитной стрелки, расположенной около проводника.

Приступая к изучению электрического тока в металлах, зададимся прежде всего вопросом, по какому физическому признаку можно отличить металл от неметалла. Таким признаком может служить зависимость электрического сопротивления вещества от температуры. Поставим опыт. Включим в электрическую цепь проволочное сопротивление и будем измерять ток в цепи. Заметим, что при нагревании проволоки величина тока в цепи уменьшается, а при охлаждении — увеличивается. На основании этого опыта можно сделать вывод, что сопротивление металлической проволоки растет с увеличением температуры (рис. 11).

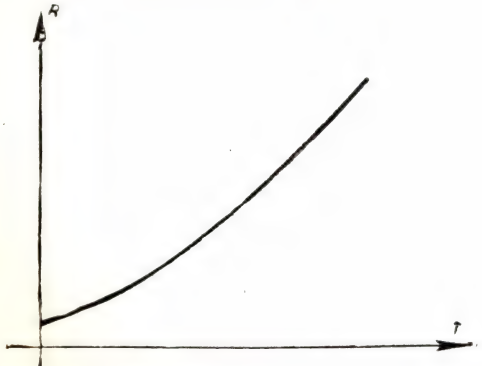


Рис. 11. Зависимость электрического сопротивления (R) от температуры (T) для металлов, не переходящих в сверхпроводящее состояние.

Что же происходит в металле при прохождении по нему электрического тока и почему электрическое сопротивление металла растет с повышением температуры?

Тепловое движение в металлах существенно отличается от теплового движения в газе. Ионы, образующие остов кристаллической решетки, не могут перемещаться по металлу подобно свободным электронам. Они совершают лишь колебания около некоторых средних положений, называемых узлами кристаллической решетки. Это движение можно уподобить движению шарика на пружинках (рис. 12).

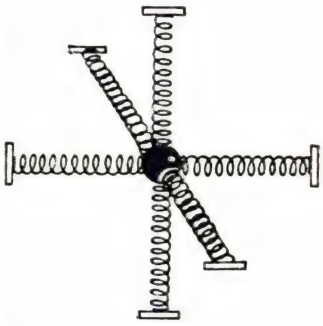


Рис. 12. Движение ионов в металле подобно движению шарика, закрепленного на пружинках.

При нагревании металла размах колебаний ионов около узлов кристаллической решетки возрастает. Чем выше температура, тем больше амплитуда колебаний, а следовательно, и энергия колебательного движения ионов.

При подключении металлического проводника к источнику тока внутри проводника возникает электрическое поле. При этом на заряженные частицы будет действовать сила, равная произведению электрического заряда на напряженность электрического поля. Под действием этой силы свободные электроны будут перемещаться по металлу. Их движение и создает электрический ток.

Какова же роль ионов при прохождении электрического тока через металл? Электроны под действием электрического поля движутся с ускорением. Это значит, что скорость свободных электронов, а следовательно, и их кинетическая энергия возрастают. При своем движении электроны сталкиваются с ионами кристаллической решетки, передавая им при этом часть своей кинетической энергии. В результате вдоль металла устанавливается движение свободных электронов с некоторой постоянной средней скоростью — по металлическому проводнику идет постоянный ток. Таким образом, приобретаемая в промежутках между столкновениями в результате ускоренного движения под действием поля кинетическая энергия передается от свободных электронов ионам кристаллической решетки. Ионы препятствуют движению свободных электронов. Этим обусловлено электрическое сопротивление металлов. Оно

растет при повышении температуры вследствие увеличения частоты столкновений электронов с ионами решетки.

Напряженность электрического поля в металле растет с увеличением разности потенциалов. Связь между величиной тока, разностью потенциалов и электрическим сопротивлением устанавливается на опыте и определяется законом Ома. Согласно ему ток на участке проводника прямо пропорционален разности потенциалов на концах участка и обратно пропорционален его электрическому сопротивлению.

Нарисованная выше картина движения электронов в металле при прохождении через него электрического тока позволяет понять смысл закона Ома. Действительно, чем больше на концах данного металлического образца (например, куска проволоки) разность потенциалов, тем больше напряженность электрического поля, тем больше будет сила, действующая на свободные электроны, тем больше скорость их движения. Поэтому с ростом разности потенциалов ток возрастает.

Пусть теперь разность потенциалов постоянна, и мы включаем в цепь одинаковые по размерам куски проволоки, сделанные из разных металлов. Теперь ток будет больше в том металлическом образце, в котором взаимодействие электронов с ионами слабее и ионы меньше препятствуют движению электронов. С уменьшением сопротивления ток увеличивается.

Куда же переходит энергия, которая передается электронами ионам при их взаимодействии? Как мы уже говорили, ионы не могут свободно перемещаться вдоль металла. Передаваемая им энергия идет на увеличение размаха колебаний, на возрастание энергии теплового движения. И в самом деле, прохождение электрического тока сопровождается нагреванием металла. Связь между количеством выделившейся теплоты, величиной тока и сопротивлением выражается законом Джоуля—Ленца. Однако не всегда прохождение тока через металлы происходит так, как это описано выше.

Еще в 1911 г. голландский физик Камерлинг-Оннес открыл замечательное явление, которое называют **сверхпроводимостью**. Он изучал прохождение электрического тока через ртуть при низких температурах. Оказалось, что электрическое сопротивление ртути при температуре 4,12° по абсолютной шкале температур падает до нуля (рис. 13). В настоящее время известны 23 чистых металла, обладающих свойством сверхпроводимости. Им обладают также очень многие соединения и сплавы. В таблице приведена температура перехода в сверхпроводящее состояние для некоторых проводников.

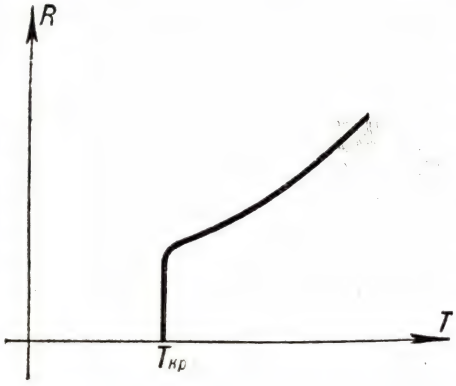


Рис. 13. Электрическое сопротивление ртути при температуре $T_{кр} = 4°,12$ исчезает, ртуть переходит в сверхпроводящее состояние.

Вещество	Температура перехода	Вещество	Температура перехода
Ртуть	4,12	Тантал	4,38
Свинец	7,26	Ниобий	9,22
Алюминий	1,14	Карбид ниобия	10,1
Цинк	0,79	Нитрид ниобия	23,0

Сверхпроводники обладают также замечательными магнитными свойствами. В 1933 г. немецкий ученый Мейснер обнаружил, что при переходе в сверхпроводящее состояние магнитное поле полностью выталкивается из объема сверхпроводника и концентрируется в узком поверхностном слое (порядка 10^{-5} *см*). Таким образом, магнитное поле не проникает внутрь вещества, находящегося в сверхпроводящем состоянии. Магнитные силовые линии как бы обтекают сверхпроводник, не проникая в него.

Более сорока лет не удавалось дать объяснение этим замечательным явлениям. В изучении явления сверхпроводимости большую роль сыграли работы Лондона, Пиппарда, Л. Д. Ландау, А. И. Шальникова и многих других ученых.

Лишь в 1957 г. была создана теория сверхпроводимости. Согласно этой теории, состояние теплового движения в металле, находящемся в сверхпроводящем состоянии, существенно отличается от состояния теплового движения в обычном (несверхпроводящем) состоянии металла. Механизм электропроводности сверхпроводников иной, чем описанный выше механизм проводимости обычных металлов. Электроны в этом случае образуют с колеблющимися ионами связанную систему.

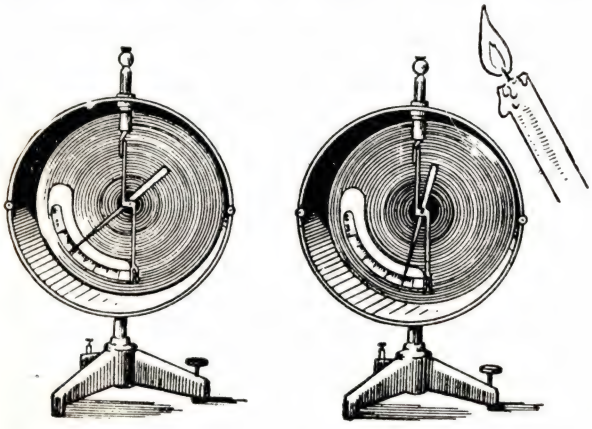
Основа современной теории сверхпроводимости заложена в работах английского физика Г. Фрелиха, американских физиков Бардина, Купера, Шриффера. Существенным вкладом в теорию этого явления служит новый метод в теории сверхпроводимости и сверхтекучести, разработанный советским ученым акад. Н. Н. Боголюбовым в 1958 г. За работы в области теории сверхтекучести и сверхпроводимости акад. Н. Н. Боголюбов был удостоен Ленинской премии.

Зависимость сопротивления металла от температуры используется в так называемых термометрах сопротивления. Температура в этом случае определяется по величине сопротивления металлической проволоки. Такие термометры установлены, например, на башнях Московского университета на Ленинских горах. Достоинство термометров сопротивления состоит, в частности, в том, что они могут использоваться как при высоких, так и при очень низких температурах.

Особые свойства сверхпроводников открывают широкие возможности для различных их применений.

ПРОХОЖДЕНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ТОКА ЧЕРЕЗ ГАЗЫ

При обычных условиях газы, в том числе и воздух, не являются проводниками. В этом легко убедиться, наблюдая за положением стрелки заряженного электрометра. Если воздух в помещении, где находится электрометр, сухой, то заряд электрометра долгое время остается неизменным (рис. 14 *а*). Однако воздух можно сделать проводником. Для этого его надо подвергнуть одному из следующих воздействий: нагреть, например, поднеся свечу или горелку к электрометру (рис. 14 *б*), облучить ультрафиолетовыми или рентгеновскими лучами, подвергнуть действию радиоактивного излучения и т. п. При всех этих воздействиях, если, конечно, они достаточно интенсивны, электрометр быстро разряжается. Это значит, что газ при этих воздействиях становится проводником электричества.



а) *б)*

Рис. 14: а) при отсутствии ионизатора заряд электрометра долгое время сохраняется; б) если к электрометру поднести свечу, то происходит ионизация воздуха, воздух становится проводником электричества, и электрометр начинает разряжаться.

Почему же меняются электрические свойства газа при наличии указанных выше воздействий?

При обычных условиях газы состоят из нейтральных атомов или молекул. Под действием высокой температуры и различных излучений из части нейтральных атомов вырываются электроны. В результате образуются положительно заряженные ионы и свободные электроны. Могут образовываться также и отрицательные ионы[1]. Появление в газе заряженных частиц и делает его проводником электричества.

Процесс образования ионов и электронов в газах называется **ионизацией**. Все перечисленные выше факторы, вызывающие появление ионов, называются ионизаторами. Если ионизатор перестает действовать, то заряженный электрометр будет опять сохранять заряд, т. е. газ перестает быть проводником. Происходит это вследствие того, что ионы и электроны, находясь в непрерывном тепловом движении и сталкиваясь друг с другом, вновь образуют нейтральные атомы и молекулы. Этот процесс называется **рекомбинацией** (воссоединением) ионов.

Возьмем наполненную разреженным газом стеклянную трубку с двумя металлическими электродами. Включим ее в электрическую цепь. Поднесем какой-либо ионизатор, за счет которого в газе образуется определенное число пар ионов противоположных знаков (положительно заряженный ион и электрон, положительно заряженный ион и отрицательно заряженный ион). Если разность потенциалов на электродах трубки равна нулю, то установится динамическое равновесие, при котором число вновь образующихся пар ионов будет равно числу пар ионов, исчезающих вследствие рекомбинации.

[1] В том, например, случае, когда к нейтральному атому или молекуле присоединяется электрон.

Если к электродам приложить небольшую разность потенциалов, то положительно заряженные ионы начнут перемещаться к отрицательному электроду, а отрицательно заряженные — к положительному. Вследствие этого в трубке, наполненной газом, возникнет электрический ток. Прохождение электрического тока через газ называется газовым разрядом. При этом лишь часть пар ионов, образующихся за счет ионизатора, будет рекомбинировать в объеме газа, а остальные будут нейтрализоваться на электродах. Увеличивая разность потенциалов, достигнем того, что практически все ионы нейтрализуются у электродов. При таком значении разности потенциалов ток, казалось бы, должен достигнуть максимального значения и при дальнейшем увеличении разности потенциалов оставаться неизменным (рис. 15).

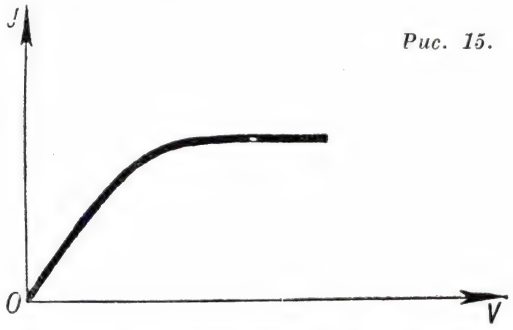


Рис. 15.

Однако опыт показывает, что при дальнейшем увеличении разности потенциалов, начиная с некоторого значения, называемого потенциалом зажигания ($V_з$), ток снова возрастает (рис. 16). Это значит, что в газе появляются

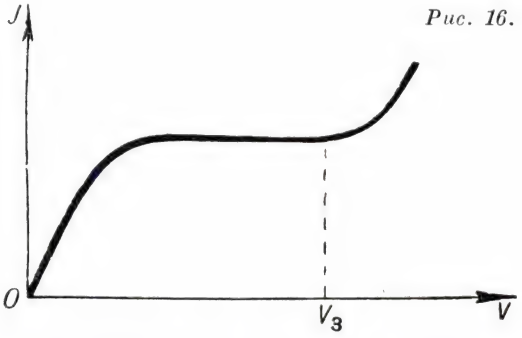


Рис. 16.

дополнительные ионы сверх тех, которые образуются за счет ионизатора. Количество новых ионов должно быть очень большим, так как ток может возрастать в сотни и тысячи раз. Разряд при этом начинает светиться. Если теперь выключить ионизатор, то разряд не прекращается. Это значит, что ионы теперь могут образовываться в газе без внешнего ионизатора в результате процессов, происходящих в самом разряде. Газовый разряд, который уже не нуждается во внешнем ионизаторе для своего поддержания, называется самостоятельным разрядом. Напряжение, при котором возникает самостоятельный разряд, называется напряжением зажигания.

Как объяснить резкое увеличение тока в разряде при потенциалах, бóльших потенциала зажигания? Рассмотрим какую-либо пару ионов (положительный ион и электрон), которая образовалась за счет внешнего ионизатора. Появившийся таким образом свободный электрон начинает двигаться к положительному электроду. На своем пути он встречает ионы и нейтральные атомы. В промежутках между двумя последовательными столкновениями его энергия увеличивается за счет приложенной разности потенциалов. При столкновении с ионом или атомом электрон передает им часть своей энергии. Если разность потенциалов достаточно велика, то кинетическая энергия электрона становится настолько большой, что при столкновении с нейтральным атомом он может произвести его ионизацию. Полученные таким путем два электрона в свою очередь будут ускоряться и ионизировать встречные атомы. Таким образом, при потенциалах, бóльших потенциала зажигания, число ионов в газе начинает быстро нарастать и уже не за счет внешнего ионизатора, а вследствие процессов, происходящих в самом разряде.

Возможны другие способы образования ионов в газе, которые также приводят к развитию самостоятельного разряда. В зависимости от характера самостоятельного разряда и способа образования в нем ионов различают тлеющий, дуговой, искровой, коронный и другие разряды.

Тлеющий разряд обычно наблюдается при давлениях в несколько десятков миллиметров ртутного столба и более низких. Но в специальных условиях удается получить тлеющий разряд и при более высоких давлениях. В тлеющем разряде положительные ионы, которые образуются электронными ударами в газе, при своем движении к катоду приобретают большую энергию. При ударах таких быстрых ионов о катод происходит выбивание электронов из металла (вторичная электронная эмиссия). Эти два процесса (ионизация электронным ударом и вторичная электронная эмиссия на катоде) и являются основными в тлеющем разряде.

Рассмотрим некоторые применения тлеющего разряда. Тлеющий разряд используется в ряде приборов: выпрямителях тлеющего разряда, преобразующих переменный ток в постоянный, в тлеющих стабилизаторах напряжения — стабиловольтах, поддерживающих постоянное электрическое напряжение. Тлеющий разряд возникает при зажигании сигнальных неоновых лампочек, в лампах дневного света и в рекламных трубках. Так, в лампах дневного света тлеющий разряд обычно происходит в парах ртути. Излучение паров ртути, которое, в основном, приходится на фиолетовую и ультрафиолетовую области спектра, поглощается слоем специального вещества (люминофора), нанесенного на поверхность трубки. Эти вещества подбирают так, чтобы они, поглощая фиолетовые и ультрафиолетовые лучи, излучали свет, состав которого был бы близок к солнечному.

В трубках, применяемых для реклам, обычно используется тлеющий разряд в неоне (красное свечение) и в аргоне (синевато-зеленое свечение).

Большое практическое значение имеет другая форма самостоятельного разряда — дуговой разряд, который впервые был осуществлен русским академиком В. В. Петровым в 1802 г. Дуговой разряд можно получить, увеличивая в тлеющем разряде величину тока и уменьшая внешнее сопротивление.

Наиболее просто дуговой разряд получается путем раздвижения угольных электродов. При этом из-за увеличения сопротивления между электродами резко увеличивается температура, воздух ионизируется и начинается разряд. Температура кратера дуги (углубления, образующегося на положительном электроде) при атмосферном давлении достигает 4000°С, а при давлении 20 *атм* превышает 7000°С. Чтобы представить себе, сколь велика эта температура, можно сравнить ее с температурой поверхности Солнца — фотосферы,— равной примерно 6000°С.

Высокая электропроводность газа в дуговом разряде обеспечивается большим числом электронов, вылетающих из катода. Вылет большого числа электронов из катода обусловлен его высокой температурой. При этом происходит процесс термоэлектронной эмиссии[1].

Электрическая дуга является мощным источником света и используется в прожекторах, проекционных и киноаппаратах. В настоящее время в качестве источников света используются дуговые лампы, в которых дуговой разряд происходит при высоком давлении.

Дуговой разряд используется для сварки и резания металлов. В металлургии широко используются электропечи, в которых источником теплоты является электрическая дуга.

Дуговой разряд низкого давления с ртутным катодом в парах ртути используется в ртутных выпрямителях переменного тока. Отличительная черта ртутных выпрямителей — малое внутреннее сопротивление. Ими пользуются для выпрямления переменных токов большой величины (сотни ампер). Ртутный дуговой разряд применяется в медицине в качестве источника ультрафиолетовых лучей.

Большой интерес представляет искровой разряд. По внешнему виду искровой разряд представляет собой пучок ярких зигзагообразных разветвляющихся от тонкого канала полосок. Они быстро пронизывают разрядный промежуток, гаснут, затем возникают вновь. Для возникновения электрической искры необходимо, чтобы напряженность электрического поля в газе превышала некоторое критическое значение. Для воздуха при атмосферном давлении оно равняется примерно 30 000 *в/см*; с ростом давления его величина увеличивается.

Примером гигантского искрового разряда является молния. Молнии возникают или между облаками, или между облаком и землей. Величина тока в молнии достигает полумиллиона ампер, а напряжение между облаком и землей — миллиарда вольт. Отдельные разряды молнии очень кратковременны, всего лишь около одной миллионной доли секунды.

При образовании искрового разряда наряду с образованием ионов при столкновениях существенную роль играет также ионизация за счет излучения самой искры, температура газа в канале которой может превышать 100 000°С. Степень ионизации в канале искры близка к 100%.

Отметим еще очень красивое и своеобразное явление — шаровую молнию — яркое светящееся образование, которое сравнительно медленно перемещается в воздухе. Размеры шаровых молний могут быть различны. Чаще всего наблюдаются молнии диаметром 10—20 *см*, но иногда они достигают десятков метров в диаметре. Продолжительность существования шаровой молнии различна: от долей секунды до нескольких минут. Исчезает она внезапно, взрываясь и причиняя при этом иногда значительные раз-

[1] Термоэлектронная эмиссия — испускание электронов сильно нагретым телом.

рушения. Попытки разгадать природу шаровой молнии и получить ее в лаборатории пока еще не увенчались полным успехом.

Наблюдения показывают, что на земном шаре за сутки происходит более сорока тысяч гроз, а среднее число ударов молний в секунду около двух тысяч. Для защиты различных сооружений от разрушения при ударе молнии применяются молниеотводы.

На верхушках деревьев, корабельных мачт и других выступающих предметов иногда появляется свечение. В старину оно вызывало суеверный ужас у мореплавателей. Его называли «огнями святого Эльма». Это свечение представляет одну из разновидностей коронного разряда. Опытным путем коронный разряд получают на электродах из тонкой проволоки или с заостренными выступающими частями. Около выступающих частей напряженность поля может достигать очень больших значений. Если она превышает критическое значение (около 30 000 *в/см* при атмосферном давлении), то воздух вблизи электрода ионизируется и происходит разряд. Светящаяся область разряда, сосредоточенная около выступающих частей, в некоторых случаях напоминает корону.

Коронный разряд может возникнуть на выступающих частях или в проводах линий высокого напряжения, что приводит к значительным потерям электроэнергии. Уменьшают возможность возникновения коронного разряда, увеличивая диаметр проводов.

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ТОК В ЖИДКОСТЯХ

Жидкости, как и твердые тела, могут быть и диэлектриками, и проводниками. К числу жидких диэлектриков относятся, например, дистиллированная вода, керосин, различные масла́. Проводящие жидкости различаются по механизму переноса электрических зарядов. Так, например, в ртути и расплавленных металлах (медь, серебро и т. д.) перенос зарядов осуществляется, как и в твердых металлах, свободными электронами.

Однако существует очень большое число жидкостей с совершенно иным механизмом электропроводности. К числу таких жидкостей относятся растворы солей, кислот, щелочей, расплавленные соли — это так называемые электролиты. В чем же их особенности и каким образом происходит в них перенос электрического заряда? Возьмем раствор поваренной соли NaCl в воде. Часть молекул в нем распадается на положительно и отрицательно заряженные ионы Na^+, Cl^-. Такое разложение молекул в растворе на ионы называется электролитической диссоциацией. Степень диссоциации, т. е. доля молекул растворенного вещества, которые распадаются на ионы, зависит от температуры, концентрации раствора и природы растворителя. Ионы разных знаков, встречаясь, могут вновь воссоединяться в нейтральные молекулы. При заданных условиях в растворе устанавливается динамическое равновесие, при котором число молекул, распадающихся на ионы в единицу времени, равно числу пар ионов, которые в единицу времени вновь воссоединяются в нейтральные молекулы.

Если включить сосуд с электролитом в электрическую цепь, то отрицательные ионы придут в движение по направлению к положительному электроду, а положительные — к отрицательному. Появится электрический ток. При этом произойдет электролиз — выделение на электродах веществ, входящих в состав электролита.

Электролиз широко применяется в технике. Для того чтобы покрыть, например, детали велосипеда тонким слоем никеля или хрома для предохранения от ржавления, их помещают в раствор солей этих металлов в качестве катода. Анод делают из металла, которым хотят покрыть деталь. Если пропускать ток через раствор, то металлический анод будет растворяться, а на катоде будет выделяться металл в виде тонкой пленки. Такой способ покрытия называется гальваностегией. Электролизом пользуются также для получения металлических отпечатков с рельефных предметов (медалей, монет, барельефов и т. д.). Для этого сначала получают на доске или стеарине отпечаток предмета. Затем, чтобы сделать

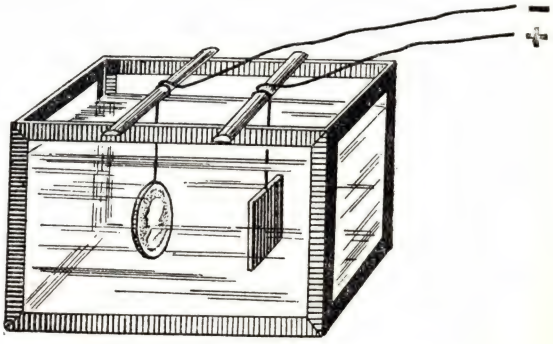


Рис. 17. Гальваническая ванна.

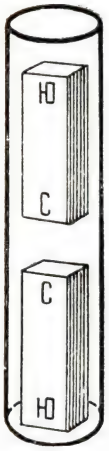


Рис. 18.

отпечаток электропроводящим, его покрывают графитом. После этого его помещают в раствор в качестве катода и осаждают на нем тот или иной металл (рис. 17). Таким образом получают металлическую копию предмета.

При помощи электролиза получают алюминий. Электролизом пользуются для получения чистых металлов (рафинирование меди).

МАГНИТНОЕ ПОЛЕ

Поставим следующий опыт. В стеклянную трубку (рис. 18) поместим два сильных магнита одноименными полюсами навстречу друг другу. Заметим, что магниты отталкиваются, и верхний магнит парит над нижним, не касаясь его. Падению верхнего магнита препятствует некоторая особая форма материальной среды, через которую передается взаимодействие магнитов. Эту среду называют м а г н и т н ы м п о л е м.

Для определения характера магнитного поля вокруг магнита той или иной формы возьмем соответствующий магнит и небольшую магнитную стрелку, подвешенную на нити или уравновешенную на острие. Будем наблюдать за магнитной стрелкой, располагая ее в различных точках вокруг магнита. В каждой точке стрелка будет поворачиваться в определенном направлении.

Датский физик Г. Х. Эрстед в начале XIX в. заметил, что аналогичным образом ведет себя магнитная стрелка, если ее поместить вблизи проводника, по которому течет электрический ток (рис. 19).

Оказалось, что для обнаружения и исследования магнитного поля тока не обязательно брать магнитную стрелку. Магнитное поле можно обнаружить и исследовать с помощью другого проводника с током. Это важное открытие было сделано французским физиком А. Ампером в начале XIX в. Воспроизведем опыт Ампера. Из тонкой изолированной проволоки сделаем катушку, как показано на рис. 20. Такая катушка называется с о л е н о и д о м. Включим эту катушку в цепь и будем ее помещать в различных точках около проводника с током. Мы заметим, что соленоид ведет себя, подобно магнитной стрелке. В каждой точке магнитного поля он поворачивается в определенном направлении. Если взять две катушки с током, то они будут вести себя, как два магнита. Каждая из катушек имеет, подобно прямому магниту (рис. 21), два полюса — северный и южный (рис. 22). Одноименные полюса катушек отталкиваются, а разноименные — притягиваются.

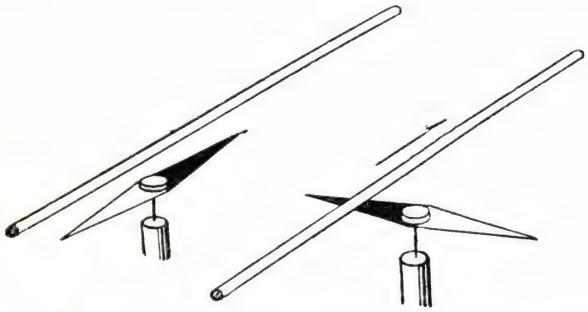


Рис. 19. Если магнитную стрелку поместить около проводника с током, то она ориентируется в определенном направлении.

Рис. 20. Соленоид.

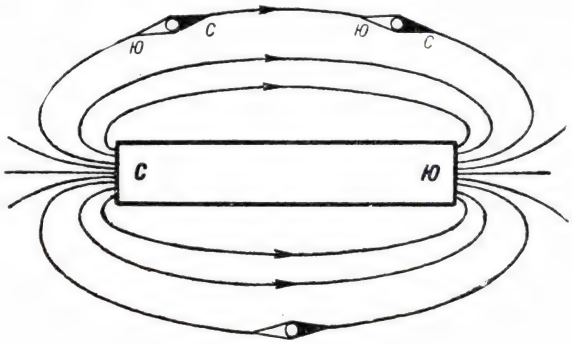


Рис. 21.

Итак, магнитная стрелка или катушка с током устанавливаются в каждой точке магнитного поля в определенном направлении. Это значит, что если их располагать произвольно, то на них будет действовать вращающий момент (момент сил) до тех пор, пока они не займут вполне определенного для данной точки поля положения.

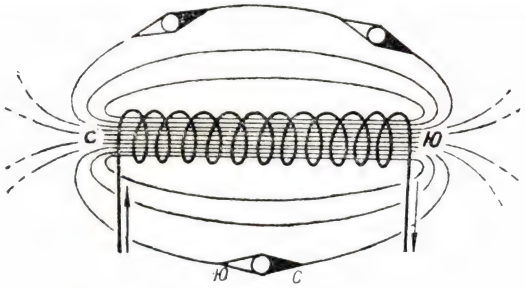


Рис. 22.

Рис. 23. Распределение магнитных силовых линий вокруг прямолинейного проводника.

Как вам уже известно, каждая точка электрического поля характеризуется напряженностью электрического поля. Каждая точка магнитного поля также характеризуется определенной напряженностью. За направление напряженности магнитного поля в данной точке принимают направление, по которому в данной точке поля располагается магнитная стрелка или катушка с током.

Поместим по очереди в одну и ту же точку поля две катушки, подвешивая их на упругой нити. Будем располагать катушки так, чтобы направление их было перпендикулярным к направлению напряженности магнитного поля в этой точке. При таком расположении катушек вращающие моменты сил будут максимальными. Так как катушки подвешены не свободно, а на упругой нити, то они не смогут расположиться вдоль направления напряженности магнитного поля, а повернутся лишь на небольшие углы. По величине этих углов можно определить вращающие моменты, которые действуют на каждую из катушек. Измерения показывают, что на разные катушки, помещенные в данную точку поля, действуют и разные вращающие моменты. Величина вращающего момента пропорциональна напряженности в данной точке поля и так называемому магнитному моменту катушки, который зависит от тока, числа витков катушки и ее поперечного сечения. Направлен магнитный момент вдоль катушки, от южного полюса к северному. Магнитная стрелка также имеет определенный магнитный момент. Из всего сказанного следует, что если магнитная стрелка или катушка подвешены свободно, то они будут поворачиваться до тех пор, пока их магнитные моменты не совпадут с направлением напряженности магнитного поля в данной точке.

Магнитное поле можно очень наглядно изобразить графически с помощью магнитных силовых линий. Это — линии, касательные к которым в каждой точке совпадают с направлением напряженности магнитного поля в этих точках.

Картину расположения магнитных силовых линий легко получить на опыте. Для этого в различные точки поля поместим маленькие магнитные стрелки. В каждой точке они повернутся по направлению напряженности магнитного поля, как бы выстраиваясь вдоль силовых линий. В качестве таких маленьких магнитных стрелок можно взять железные опилки. На рис. 23—25 приведены полученные таким образом картины распределения магнитных силовых линий вокруг проводников различной формы. Магнитные силовые линии всегда замкнуты. В этом их существенное отличие от электрических.

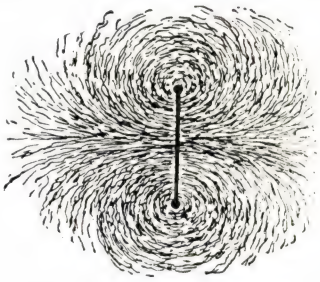


Рис. 24. Распределение силовых линий магнитного поля кругового тока.

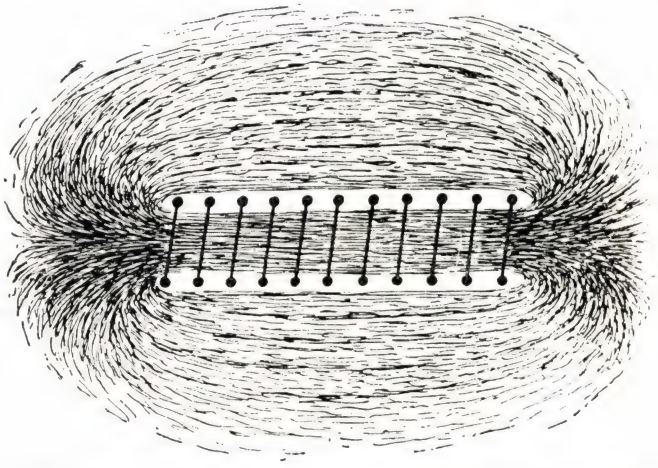


Рис. 25. Силовые линии магнитного поля вокруг соленоида

Сходство в поведении магнитов и катушек с током навело Ампера на мысль, что и поле магнитов также создается токами.

Дальнейшее развитие учения о магнитных явлениях подтвердило правильность гипотезы Ампера. Теперь твердо установлено, что магнитное поле магнитов создается внутриатомными токами. Они существуют в каждом атоме и создаются вследствие движения электронов в атомах. Более того, было установлено, что магнитное поле возникает не только при движении зарядов по проводникам и электронов в атомах, но и при любых движениях заряженных частиц.

МАГНИТНЫЕ СВОЙСТВА ВЕЩЕСТВА

Возьмем катушку и стальной стержень, не обладающий магнитными свойствами, т. е. такой, напряженность магнитного поля вокруг которого равна нулю. Если через катушку пропустить электрический ток, то вокруг нее возникнет магнитное поле и она начнет притягивать железные предметы.

Поместим внутрь соленоида стальной стержень. Нетрудно убедиться, что стержень, помещенный в магнитное поле катушки, приобретает магнитные свойства. Теперь он притягивает железные предметы. При этом магнитные свойства катушки со вставленным в нее стержнем (его называют сердечником) значительно сильнее, чем без сердечника. Напряженность магнитного поля катушки с сердечником значительно больше, чем катушки без сердечника. Катушка с помещенным в нее сердечником называется электромагнитом (рис. 26). Иногда электромагниты имеют две катушки, надетые на концы U-образно изогнутого сердечника.

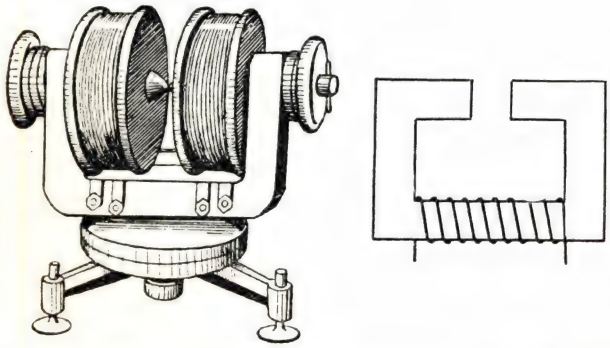


Рис. 26. Лабораторный электромагнит. Справа—одна из схем лабораторного электромагнита.

Итак, располагая источником сильного магнитного поля — электромагнитом, посмотрим, как будут вести себя различные вещества в магнитном поле. Как ведет себя железо, сталь в магнитном поле, мы уже знаем. При внесении в катушку с током железного или стального сердечника они сильно намагничиваются и напряженность магнитного поля около катушки намного возрастает. Если же вместо стального взять, например, медный или алюминиевый стержень, то заметного увеличения напряженности магнитного поля не происходит. Эти наблюдения показывают, что среди веществ имеются такие, которые намагничиваются сильно, и такие, которые если и намагничиваются, то очень слабо. Вещества, которые сильно намагничиваются, называются ферромагнитными. К числу ферромагнитных веществ относятся четыре чистых металла: железо, кобальт, никель и гадолиний,— многие сплавы, а также окислы железа, марганца, кобальта или других металлов. Ферромагнитные вещества, кроме способности сильно намагничиваться, обладают и рядом других интересных свойств. Рассмотрим некоторые из них. Стальной стержень сохраняет магнитные свойства длительное время и после выключения тока в катушке, т. е. после того как магнитное поле катушки исчезло. В большей или меньшей степени этим свойством обладают все ферромагнитные вещества. Таким образом, ферромагнитные вещества можно намагнитить, помещая их в магнитное поле, и они могут находиться в намагниченном состоянии продолжительное время. Все постоянные магниты, которые широко применяются в технике, сделаны из ферромагнитных веществ. Способность сильно намагничиваться все ферромагнитные вещества теряют при нагревании их выше определенной для каждого вещества температуры. Для железа эта температура равна 768°С, для никеля 365°С, для кобальта около 1130°С. При понижении температуры ферромагнитные свойства восстанавливаются.

Выясним теперь, влияет ли магнитное поле на другие вещества, которые не являются ферромагнитами. Воспользуемся для опытов описанным выше электромагнитом. Будем помещать между концами сердечника сделанные из различных веществ образцы. Если поместить стрелку из ферромагнитного вещества, то она, намагнитившись, повернется вдоль направления напряженности магнитного поля. Оказывается, что подобным же образом ведут себя и многие другие вещества, не являющиеся ферромагнитными. Например, так будут вести себя стрел-

ки, сделанные из марганца, хрома, платины и др. То, что стрелки, сделанные из этих веществ, ориентируются всегда вдоль поля, указывает, что эти вещества также намагничиваются, т. е. приобретают магнитный момент, но только степень их намагниченности очень мала. Такие вещества называются парамагнитными. Парамагнитными являются многие газы, например молекулярный кислород, окись азота, и многие жидкости. Так, например, ампула с парамагнитным раствором хлористого железа устанавливается вдоль магнитного поля (рис. 27). Таким образом, поведение ферромагнитных и парамагнитных веществ в магнитном поле одинаково, только резко различна величина их намагниченности.

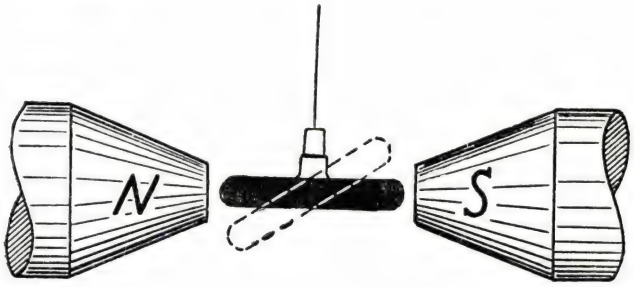


Рис. 27. Ампула, наполненная раствором парамагнитного вещества, поворачивается вдоль направления магнитных силовых линий.

Существует и третий тип веществ, поведение которых в магнитном поле существенно иное. Их называют диамагнитными. Если палочку из висмута поместить в магнитное поле, то она поворачивается перпендикулярно к направлению магнитного поля (рис. 28). К числу диамагнитных веществ относятся медь, алюминий, висмут, серебро, сурьма и др. Диамагнитными являются ионизированные газы, пламя (рис. 29).

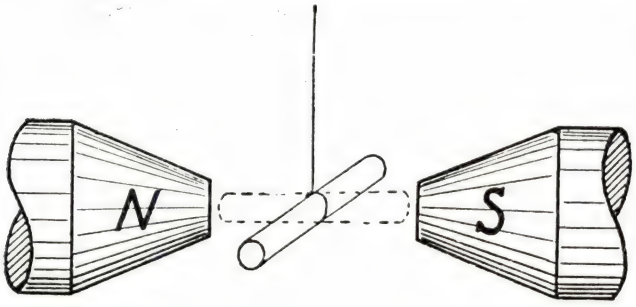


Рис. 28. Образец из диамагнитного вещества поворачивается поперек магнитных силовых линий.

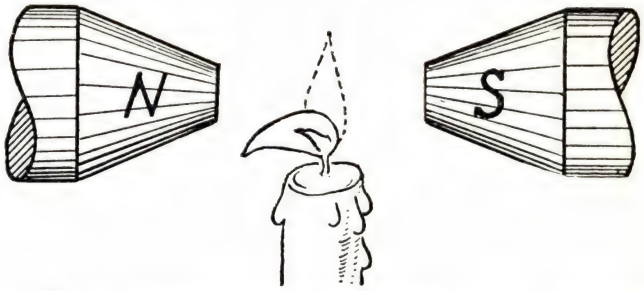


Рис. 29. Ионизированные газы являются диамагнитными, поэтому пламя свечи выталкивается из магнитного поля.

Современная физика позволяет ответить на вопрос о том, как связаны магнитные свойства различных веществ с их атомной структурой.

Как известно, атом любого вещества состоит из ядра и обращающихся вокруг него электронов. Рассмотрим движение одного из электронов вокруг ядра. За одну секунду электрон делает вокруг ядра миллион миллиардов оборотов. Вследствие этого движение одного электрона можно рассматривать как замкнутый ток. В магнитном отношении такой замкнутый ток эквивалентен катушке с одним витком. Отдельный виток, так же как и катушка, обладает магнитным моментом. Таким образом, вращение электрона вокруг ядра можно рассматривать как замкнутый ток, создающий определенное магнитное поле и обладающий определенным магнитным моментом.

Но ведь во всех атомах (кроме атома водорода) или молекулах имеется несколько электронов. Каждый из них создает магнитный момент. Магнитные моменты электронов в атоме могут быть направлены в разные стороны, так что результирующий магнитный момент всего атома или молекулы, равный сумме магнитных моментов электронов, может оказаться равным нулю. К числу таких веществ относятся металлы — медь, алюминий, висмут, сурьма; газы — гелий, неон, и некоторые другие вещества. Все эти вещества по своим магнитным свойствам оказываются диамагнитными. Почему же образцы из этих веществ поворачиваются перпендикулярно к направлению магнитного поля, в которое они помещены, или выталкиваются из него?

Оказывается, что при внесении любого вещества в магнитное поле движение электронов в атомах изменяется так, что все атомы приобретают магнитный момент и все вещество оказывается намагниченным. Однако магнитное поле вещества будет противоположно внешнему магнитному полю. Поэтому вещество будет

выталкиваться из магнитного поля, в котором находится, или ориентироваться так, чтобы ослабить действие этого поля.

Диамагнитный эффект очень мал, поэтому, хотя он и присущ всем веществам, наблюдается он только у тех веществ, атомы которых не имеют постоянного результирующего магнитного момента. У всех остальных веществ он заглушается во много раз преобладающим парамагнитным или ферромагнитным эффектом.

В атомах парамагнитных веществ магнитные моменты отдельных электронов таковы, что полный магнитный момент атомов или молекул не равен нулю.

Почему же тогда мы не замечаем намагниченности парамагнитных веществ, если они не находятся в магнитном поле? Дело в том, что вследствие теплового движения атомов их магнитные моменты располагаются хаотично. Магнитный момент всего образца, равный сумме магнитных моментов всех атомов, в этом случае будет равен нулю. Когда же образец помещен в магнитное поле, то магнитные моменты отдельных атомов, подобно маленьким магнитным стрелкам, стремятся повернуться вдоль поля. Чем сильнее внешнее магнитное поле, тем большее число магнитных моментов устанавливается вдоль поля. Теперь магнитный момент всего образца уже не равен нулю, и образец повернется в магнитном поле так, чтобы его магнитный момент совпал с направлением внешнего магнитного поля. Таким образом, различие в поведении парамагнитных и диамагнитных веществ определяется магнитными свойствами атомов вещества. Большую роль в развитии учения о магнитных свойствах парамагнитных и диамагнитных веществ сыграли английский ученый Джозеф Лармор и французские ученые Пьер Кюри и Поль Ланжевен.

Свойства ферромагнитных веществ обусловлены существованием внутри этих веществ особых областей самопроизвольного намагничивания. В отсутствие магнитного поля эти области ориентированы хаотично, так что вещество в целом не намагничено.

При помещении ферромагнитного образца в магнитном поле происходит ориентация не отдельных атомов или молекул, как в случае парамагнитных веществ, а целых областей самопроизвольного намагничивания. Поэтому эффект оказывается очень сильным.

В образовании областей самопроизвольной намагниченности основную роль играют магнитные моменты электронов, возникающие вследствие их собственного вращения. Это вращение подобно вращению Земли вокруг своей оси.

В развитие учения о магнитных явлениях в ферромагнетиках большой вклад внесли и наши отечественные ученые: А. Г. Столетов, Б. Л. Розинг, В. К. Аркадьев, Я. И. Френкель и многие другие.

Магнитные свойства вещества широко используются в различных областях науки и техники. Особенно широко применяются ферромагнитные материалы. Они используются для электрических генераторов и двигателей, для телефонных и телеграфных аппаратов, радиоприемников. Электромагниты применяются в подъемных кранах для переноски тяжелых стальных и железных предметов на заводах (рис. 30). Магниты используются в измерительных приборах: амперметрах, вольтметрах, счетчиках электроэнергии. Трансформаторы, которые применяются для преобразования напряжения и величины электрического тока, имеют сердечники, сделанные из ферромагнитных материалов. Ферромагнетики используются для получения ультразвуковых колебаний.

ЭЛЕКТРОМАГНИТНАЯ ИНДУКЦИЯ

Поворот магнитной стрелки вблизи проводника с током в опытах Эрстеда впервые указал на связь электрических и магнитных явлений. Электрический ток создает вокруг себя магнитное поле. А нельзя ли вызвать появление тока посредством магнитного поля? Такую задачу поставил М. Фарадей. В 1821 г. он записал в дневнике: «Превратить магнетизм в электричество». Успех пришел не сразу. Только глубокая уверенность в единстве сил природы и упорный труд привели его через десять лет к новому великому открытию.

Рис. 30. Сильные электромагниты используются на заводах для переноса тяжелых железных и стальных предметов.

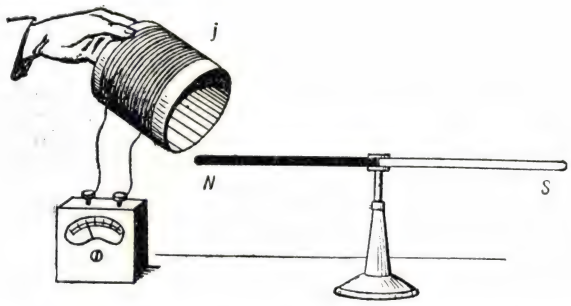


Рис. 31. При перемещении катушки в поле магнита в ней возникает индукционный ток.

Решение задачи долго не давалось Фарадею и другим ученым, потому что они надеялись получить ток в неподвижной катушке под действием постоянного магнитного поля. Между тем, как выяснилось впоследствии, только при изменении числа силовых линий магнитного поля, пронизывающих катушку, в ней может возникнуть ток.

Замечательные опыты Фарадея в настоящее время без особого труда может проделать каждый. Для этого нужен только магнит, две проволочные катушки, источник тока и гальванометр.

Закрепим на подставке магнит и поднесем к нему катушку, концы которой присоединены к гальванометру (рис. 31). Поворачивая, наклоняя и перемещая катушку вверх и вниз, мы меняем число силовых линий магнитного поля, пронизывающих ее витки. Гальванометр при этом регистрирует возникновение в катушке тока, величина и направление которого будут меняться. Если магнит и катушка покоятся относительно друг друга, тока в катушке не будет.

Возникновение в катушке тока при изменении магнитного поля, пронизывающего катушку, носит название явления электромагнитной индукции. Возникающий при этом ток называется индукционным.

Можно катушку оставлять неподвижной, а перемещать магнит. Эффект будет тот же самый. Можно обойтись совсем без магнита, используя вторую катушку. Если через одну из катушек пропустить ток, то при взаимном перемещении катушек в другой катушке будет возникать индукционный ток. Можно, наконец, одеть одну катушку на другую и менять величину тока одной из них, замыкая и размыкая ключ (рис. 32). В этом случае в другой катушке также будет возникать индукционный ток, так как магнитное поле, пронизывающее катушку, меняется.

Во время опытов легко обнаружить, что при увеличении числа силовых линий, пронизывающих катушку, стрелка гальванометра отклоняется в одну сторону, а при уменьшении — в другую. Более внимательное исследование показывает, что величина индукционного тока прямо пропорциональна скорости изменения числа силовых линий, пронизывающих катушку. В этом существо закона электромагнитной индукции.

Русский физик Э. Х. Ленц дал правило для определения направления индукционного тока. Индукционный ток всегда направлен так, что создаваемое им магнитное поле затрудняет или тормозит вызывающее индукцию движение. Например, при приближении катушки к магниту возникающий индукционный ток имеет такое направление, что созданное им магнитное поле будет противоположно магнитному полю магнита. В результате между катушкой и магнитом возникают силы отталкивания.

Правило Ленца вытекает из закона сохранения и превращения энергии. Если бы индукционные токи ускоряли вызывающее их движение, то создавалась бы работа из ничего. Катушка сама собой после небольшого толчка устремлялась бы навстречу магниту, и одновременно индукционный ток выделял бы в ней теплоту. В действительности же индукционный ток создается за счет работы по сближению магнита и катушки.

Почему возникает индукционный ток? Глубокое объяснение явления электромагнитной индукции дал английский физик Джемс Клерк Максвелл — творец законченной математической теории электромагнитного поля.

Чтобы лучше понять суть дела, рассмотрим очень простой опыт. Пусть катушка состоит из одного витка проволоки и пронизывается переменным магнитным полем, перпендикуляр-

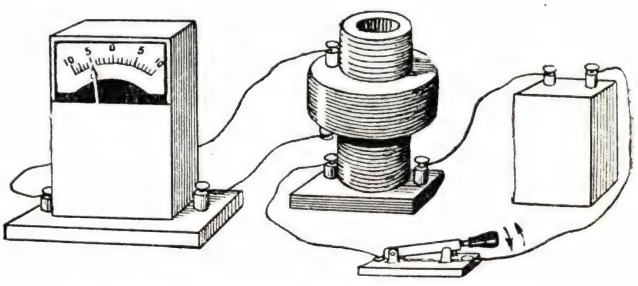


Рис. 32. При изменении величины тока в одной из катушек в другой возникает индукционный ток.

ным к плоскости витка. В катушке, естественно, возникает индукционный ток. Исключительно смело и неожиданно истолковал этот эксперимент Максвелл. При изменении магнитного поля в пространстве, по мысли Максвелла, возникает процесс, для которого присутствие проволочного витка не имеет никакого значения. Главное здесь — возникновение замкнутых кольцевых линий электрического поля, охватывающих изменяющееся магнитное поле (рис. 33).

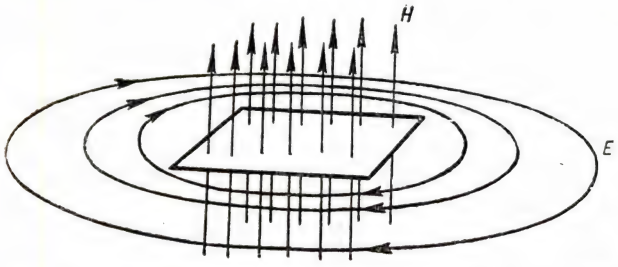


Рис. 33. Переменное магнитное поле порождает вокруг себя замкнутые линии вихревого электрического поля.

Под действием возникающего электрического поля приходят в движение электроны, и в витке возникает электрический ток. Виток — это просто прибор, позволяющий обнаружить электрическое поле. Сущность же явления электромагнитной индукции в том, что переменное магнитное поле всегда порождает в окружающем пространстве электрическое поле с замкнутыми силовыми линиями. Такое поле называется вихревым.

До сих пор мы имели дело с электрическим полем, создаваемым неподвижными электрическими зарядами. Силовые линии такого поля начинаются на положительных зарядах и оканчиваются на отрицательных, т. е. не замкнуты. Такое поле, напомним, называется потенциальным: работа сил этого поля при перемещении электрического заряда не зависит от формы пути. Вихревое поле не потенциально. Работа по перемещению электрического заряда в вихревом поле зависит от формы пути. Но все же это электрическое поле. Оно обладает главными свойствами электрического поля — способностью действовать на электрический заряд.

Большое значение имеет особый вид электромагнитной индукции— самоиндукция.

Если взять катушку с очень большим числом витков, то при замыкании цепи, изображенной на рис. 34, лампочка вспыхивает не сразу. Задержка может продлиться до несколь-

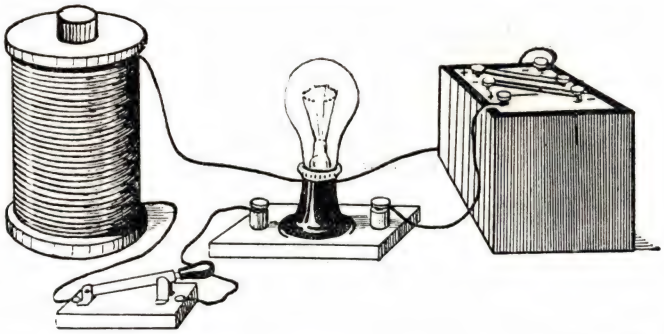


Рис. 34. При замыкании цепи с большой самоиндукцией лампочка вспыхивает не сразу.

ких секунд. Весьма поразительный на первый взгляд факт!

Чтобы понять, в чем здесь дело, необходимо разобраться в том, что происходит в момент замыкания цепи электрического тока.

В момент замыкания цепи по виткам катушки начинает течь электрический ток. В то же мгновение в пространстве вокруг катушки возникает нарастающее по величине магнитное поле. Таким образом, витки катушки оказываются пронизанными изменяющимся магнитным полем, которое концентрируется находящимся в катушке сердечником. В витках катушки возбуждается индукционный ток, который при нарастании магнитного поля (в момент замыкания цепи) направлен против основного тока.

Поэтому в момент замыкания цепи ток не сразу достигает своего максимального значения, а нарастает постепенно (рис. 35). Именно поэтому лампочка не вспыхивает сразу.

При размыкании цепи вследствие явления самоиндукции индукционный ток усиливает основной ток, благодаря чему лампочка ярко вспыхивает.

Это явление называется самоиндукцией потому, что изменение магнитного поля, которое

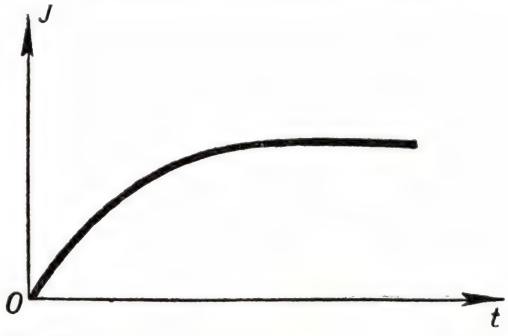


Рис. 35. Характер изменения величины тока со временем при замыкании цепи постоянного тока.

возбуждает индукционный ток в катушке, происходит при изменении силы тока, текущего по цепи. Направление тока самоиндукции определяется правилом Ленца.

Самоиндукция подобна инерции в механике. В самом деле, инерция приводит к тому, что под влиянием силы тело приобретает определенную скорость не сразу, а постепенно. Точно так же вследствие самоиндукции при включении в цепь батареи ток устанавливается не сразу. Подобно тому, как скорость не может исчезнуть сразу, не исчезнет мгновенно и ток.

Вихревые токи в массивных проводниках — еще один пример электромагнитной индукции. Вы, наверно, обращали внимание на то, что железные сердечники трансформаторов, якоря электродвигателей и генераторов никогда не делают сплошными. Их набирают из отдельных тонких листов, изолированных друг от друга слоем лака. Нетрудно понять, чем вызвано такое устройство. В переменном магнитном поле вследствие электромагнитной индукции сердечник пронизывается силовыми линиями вихревого электрического поля. Если бы он был сплошным, то это поле вызвало бы индукционные токи большой величины, так как электрическое сопротивление куска металла невелико. Сердечник разогревался бы, и большая часть электрической энергии терялась бы бесполезно. Кроме того, нужно было бы применять специальные меры для охлаждения. Изолирующие слои не позволяют индукционным токам достигать больших величин.

Индукционные токи в массивных проводниках принято называть вихревыми, так как линии этих токов замкнуты, подобно силовым линиям электрического поля, которое их порождает. Вихревые токи используются в индукционных металлургических печах для плавления металлов.

Любопытные явления возникают при взаимодействии вихревых токов с породившим их магнитным полем. Поместим, например, пятикопеечную монету между вертикально расположенными полюсами сильного электромагнита и отпустим ее. Вопреки ожиданию, она не упадет, как обычно, а будет медленно опускаться. Для прохождения нескольких сантиметров ей потребуются секунды. Движение монеты напоминает движение тела в вязкой среде. Почему это происходит?

Дело здесь в следующем. Возникающие при движении монеты в неоднородном магнитном поле вихревые токи направлены, по правилу Ленца, так, что поле магнита выталкивает монету вверх.

Это явление используется для успокоения колебаний стрелок измерительных приборов. Алюминиевая пластина, находящаяся между полюсами магнита, прикрепляется к стрелке, и вихревые токи, возникающие в ней, вызывают быстрое затухание колебаний.

Поразительной красоты демонстрацию явления электромагнитной индукции предложил профессор Московского университета В. К. Аркадьев. Если над свинцовой чашей, находящейся в сверхпроводящем состоянии (рис. 36), уронить магнит, то он не упадет. Магнит будет парить

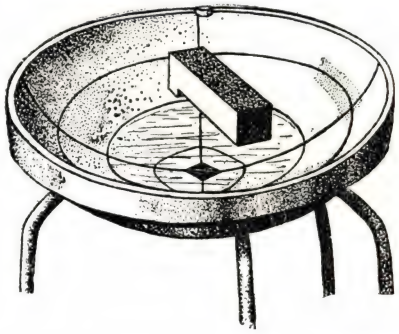


Рис. 36. Парящий магнит Аркадьева.

над чашей. Дело здесь состоит в том, что электрическое сопротивление сверхпроводника равно нулю, поэтому возникающие в нем токи очень велики и не исчезают в течение продолжительного времени. По правилу Ленца, магнитное поле этих токов направлено так, что оно отталкивает магнит и не позволяет ему упасть.

Интересно отметить, что если бы магнитное поле Земли было большим и сильно неоднородным, то быстрое движение проводящих тел стало бы невозможным. Вихревые индукционные токи, взаимодействуя с магнитным полем Земли, вызывали бы мощные тормозящие силы. Самолеты и ракеты не могли бы летать.

КАК ПОЛУЧАЮТ ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ТОК

Наиболее важное практическое значение имеет применение явле-

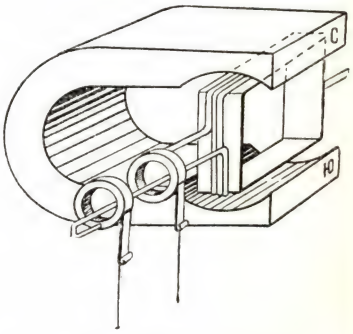


Рис. 37. Модель генератора переменного тока.

ния электромагнитной индукции в генераторах переменного и постоянного тока. Почти вся электроэнергия на земном шаре вырабатывается генераторами. В генераторах посредством явления электромагнитной индукции механическая энергия преобразуется в энергию электрического тока.

На рис. 37 вы видите между полюсами магнита закрепленную на оси катушку прямоугольной формы. При вращении катушки в ней возникает индукционный ток, который отводится во внешнюю цепь при помощи специального приспособления, не нарушая вращения катушки. Число пронизывающих катушку силовых линий непрерывно меняется. Меняется и скорость изменения числа линий. Поэтому в катушке возникает переменный электрический ток. В течение одной половины оборота он идет в одну сторону, а в течение другой половины оборота — в противоположную. Если электрическая цепь катушки не замкнута, то вращать катушку очень легко. Нужно лишь преодолевать трение в подшипниках. Однако стóит включить в цепь лампочку, и мы заметим, что вращать катушку станет значительно труднее. Это показывает, что возникающий индукционный ток направлен так, чтобы тормозить вызывающее его движение. Все происходит в соответствии с правилом Ленца. Поле магнита действует тормозящим образом на индукционный ток. Вот почему мощность, расходуемая на вращение генератора, зависит от характера электрической цепи, в которую он включен. Чем меньше сопротивление цепи, тем больше величина индукционного тока и тем больше торможение. Сопротивление же цепи уменьшается по мере увеличения числа потребителей электроэнергии. Если их нет совсем, то цепь не замкнута, и сопротивление бесконечно велико.

ПЕРЕМЕННЫЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ТОК

Если изменять разность потенциалов на концах электрической цепи, в ней возникает переменный электрический ток. С принципами действия генератора переменного тока вы уже знакомы.

Обычный промышленный ток, который питает электроприборы, изменяется с течением времени. Характер этого изменения изображен на рис. 38. За одну секунду ток совершает 50 колебаний, т. е. 100 раз в секунду меняет свое направление. Частота промышленного тока равна 50 колебаниям в секунду.

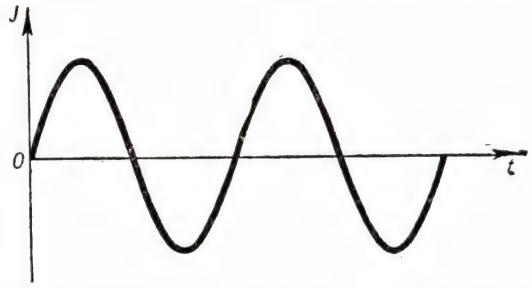


Рис. 38. Характер изменения переменного тока с течением времени.

Величина постоянного тока на участке цепи, по закону Ома, определяется напряжением на концах проводника и сопротивлением этого участка. С переменным током дело обстоит сложнее.

Простой опыт докажет это. Составим цепь из катушки с большим числом витков и лампочки. Нетрудно подобрать такое напряжение, что лампочка будет едва тлеть. Заменим теперь постоянное напряжение переменным той же величины. Лампочка совсем погаснет. Это говорит об уменьшении величины тока. Но ведь сопротивление лампочки и напряжение не изменились. В чем же дело? Вспомним, что при пропускании по проводнику переменного тока возникает явление самоиндукции. При включении напряжения ток из-за явления самоиндукции не сразу достигает максимального значения. Если напряжение быстро изменяется, ток систематически не успевает нарасти до максимальной величины. Чем больше самоиндукция проводника и чем быстрее меняется напряжение, тем меньше будет средняя величина тока. Это означает появление дополнительного сопротивления переменному току. Такое сопротивление называется индуктивным.

Переменный ток существенно отличается от постоянного еще в одном отношении. Постоянный ток не может идти по разомкнутой цепи, например через конденсатор. Только в момент включения конденсатора в цепь с постоянным напряжением по цепи пойдет ток. Но он прекратится после того, как конденсатор зарядится и разность потенциалов между пластинами станет равна напряжению источника тока, и только при разрядке конденсатора в цепи опять возникнет ток.

Если же мы включим конденсатор в цепь переменного тока, он будет непрерывно заряжаться и разряжаться и по цепи все время будет идти ток. Таким образом, присутствие в цепи конденсатора не является препятствием

для прохождения по ней переменного тока (это не означает, конечно, что свободные электроны движутся между пластинами конденсатора).

Конденсатор все же оказывает некоторое сопротивление переменному току, но оно не будет бесконечно большим, как для постоянного тока. Это сопротивление зависит от частоты переменного тока и емкости конденсатора.

Величина переменного тока по-прежнему пропорциональна напряжению, но зависит не только от обычного, омического сопротивления, но и от индуктивности и емкости цепи. Существо закона Ома сохраняется, он лишь принимает более сложную форму.

Роль катушек самоиндукции и конденсаторов далеко не сводится к появлению в цепи индуктивного и емкостного сопротивления. В цепи, содержащей катушку самоиндукции и конденсатор, возникают явления громадного практического значения — электрические колебания.

ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ТОКА

Ни одна сложная электрическая система не обходится без трансформатора — прибора, действие которого основано на явлении электромагнитной индукции. Трансформаторы предназначены для преобразования напряжения и величины переменного тока.

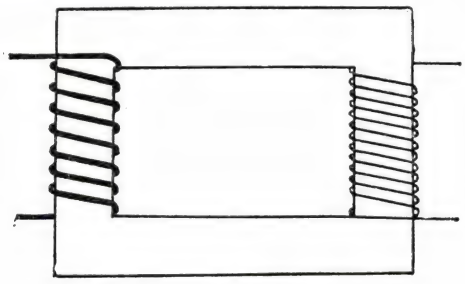


Рис. 39. Схема трансформатора.

Состоит трансформатор из двух проволочных катушек, одетых на общий сердечник (рис. 39). При прохождении тока по одной из катушек (она называется первичной обмоткой трансформатора) во второй катушке (она называется вторичной обмоткой трансформатора), замкнутой на внешнюю цепь, индуктируется ток. Почти все магнитное поле сосредоточено в сердечнике и пронизывает обе катушки. Самая замечательная особенность трансформатора заключается в зависимости напряжения на концах вторичной обмотки от соотношения числа витков обеих катушек. При одинаковом числе витков одинаково будет и напряжение на концах катушек. Во сколько раз число витков вторичной обмотки больше числа витков первичной, во столько же раз там будет больше и напряжение. Такой трансформатор будет повышающим. В принципе дело здесь в том, что в каждом витке индуктируется одинаковое напряжение, и чем больше витков, тем больше полное напряжение.

Если число витков во вторичной обмотке меньше, чем в первичной, то трансформатор будет понижающим. Напряжение во вторичной обмотке меньше, чем в первичной. Повышение напряжения связано с уменьшением величины тока в цепи вторичной обмотки. Уменьшение же напряжения, напротив, увеличивает ток.

Основное применение находят трансформаторы при передаче электроэнергии на большие расстояния. Потери энергии на выделение теплоты пропорциональны квадрату величины тока. Поэтому целесообразно передавать лишь малые токи. Чтобы с помощью небольших токов передать большую мощность, требуется напряжение в десятки и даже сотни тысяч вольт. Строить же генераторы, электродвигатели, рассчитанные на такое напряжение, крайне сложно, так как нужна очень хорошая изоляция. Кроме того, это напряжение смертельно. Давать его потребителю нельзя. Трансформаторы дают возможность легко получать любое напряжение. На рис. 40 вы видите схему передачи электроэнергии на расстояние.

Трансформаторы не имеют движущихся частей, не требуют присмотра, потери энергии в трансформаторе незначительны. Именно поэтому трансформаторы получили очень широкое применение. Они имеются в каждом радиоприемнике, в каждом телевизоре. Применение на практике в электрических сетях именно переменного тока, а не постоянного, вызвано в значительной мере простотой преоб-

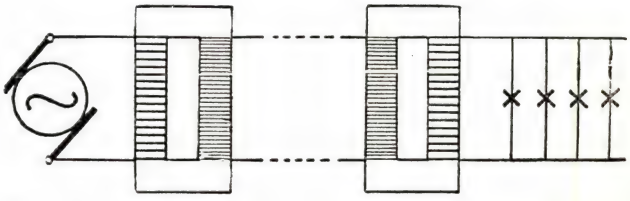


Рис. 40. Схема передачи электрического тока на большие расстояния.

разования переменного тока в трансформаторе. Постоянный ток преобразовывать значительно сложнее.

ТЕОРИЯ МАКСВЕЛЛА

Рассмотрим внимательнее, что происходит в цепи переменного тока, содержащей конденсатор. При замыкании цепи по проводнику пойдет ток. Вокруг проводника возникнут силовые линии магнитного поля.

Электрическое поле между пластинками конденсатора будет убывать, так как заряд пластин уменьшается,— процесс, казалось бы, ничего общего не имеющий с током. Но Максвелл сделал смелое предположение о том, что изменяющееся электрическое поле, как и обычный ток, создает вокруг магнитное поле с замкнутыми силовыми линиями (рис. 41). Никаких указаний на это со стороны опыта в то время еще не было.

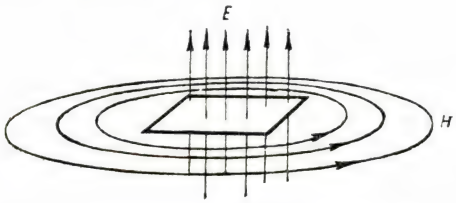


Рис. 41. Переменное электрическое поле порождает вокруг себя магнитное поле.

Процесс изменения электрического поля в пространстве Максвелл назвал током смещения. Этот ток коренным образом отличается от обычного. Общим для них является только одно: оба они порождают вокруг себя вихревое магнитное поле (рис. 42). Рассматривая переменное электрическое поле в пустом пространстве или в диэлектрике как особого рода ток, мы можем любой электрический ток считать замкнутым. При разрядке конденсатора обычный ток в проводнике (ток проводимости) дополняется в пространстве между пластинами током смещения.

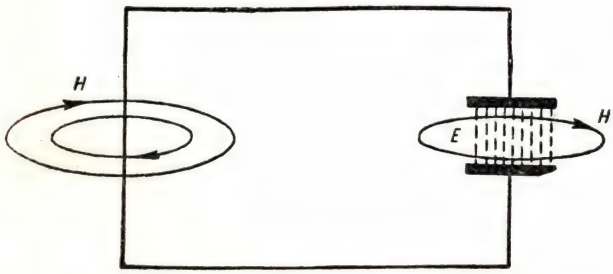


Рис. 42. Схема магнитного поля тока проводимости и тока смещения.

Таким образом, согласно гипотезе Максвелла, переменное электрическое поле порождает вихревое магнитное поле, а переменное магнитное поле порождает вихревое электрическое поле.

Следовательно, переменные электрические и магнитные поля не могут существовать в пространстве независимо. Возникновение одного из них сразу же вызывает появление другого.

Гипотеза о токах смещения позволила Максвеллу в шестидесятых годах прошлого столетия создать стройную теорию электромагнитных явлений, охватывающую всю громадную совокупность известных в то время фактов и предсказывающую новые замечательные явления. Основные положения этой теории, изложенные строгим языком математических формул, освещают взаимосвязь электрических зарядов с электрическими и магнитными полями. Обычным языком их содержание можно передать приблизительно следующим образом.

1. Магнитное поле с замкнутыми силовыми линиями порождается либо электрическим током, либо переменным электрическим полем.
2. Электрическое поле с замкнутыми силовыми линиями (т. е. вихревое) порождается переменным магнитным полем.
3. Силовые линии магнитного поля всегда замкнуты.
4. Электрическое поле с незамкнутыми линиями порождается электрическими зарядами.

Самым поразительным результатом теории Максвелла было то, что из нее автоматически вытекала конечность скорости распространения электрического и магнитного полей. При возникновении, например, электрического заряда электрическое поле первоначально устанавливается только вблизи самого заряда и лишь затем постепенно занимает все пространство. Точно так же при включении тока магнитное поле постепенно распространяется все дальше и дальше от проводника. Правда, скорость распространения поля весьма велика. Теоретически Максвелл показал, что она равна скорости света, т. е. 300 тыс. *км/сек*.

Возникающее в пространстве переменное электрическое поле порождает вокруг себя переменное магнитное поле. Это поле в свою очередь порождает электрическое поле, и т. д.

В результате в пространстве происходит процесс распространения электрического и магнитного полей. Этот процесс протекает также со скоростью света. Если начальное электрическое поле меняется периодически, то распространяющееся электромагнитное поле тоже носит периодический характер. Напряженность электрического и магнитного полей периодически изменяется в пространстве и во времени. Так, со скоростью света распространяются электромагнитные волны. Характерно, что напряженности электрического и магнитного полей перпендикулярны друг другу и к направлению распространения электромагнитной волны (рис. 43).

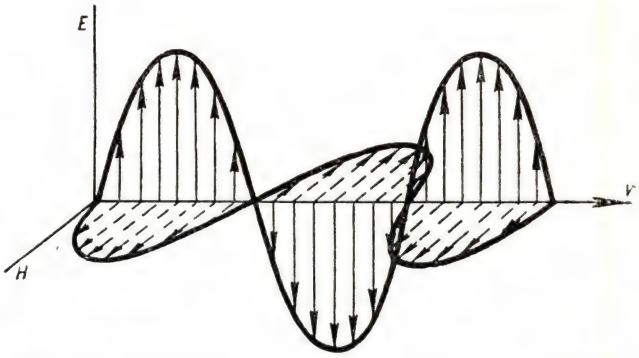


Рис. 43. Распределение электрического и магнитного полей в электромагнитной волне.

Максвелл предсказал существование электромагнитных волн и из равенства скорости их распространения скорости света сделал вывод о том, что световые волны являются электромагнитными по своей природе. Тем самым учение о свете становилось частью учения об электромагнитных явлениях.

Максвеллу не суждено было дожить до блестящего подтверждения справедливости всех своих замечательных открытий. Спустя 10 лет после его смерти немецкий физик Герц опытным путем обнаружил существование электромагнитных волн; скорость распространения этих волн оказалась равной скорости света. Тем самым электромагнитная теория света была доказана.

СВЕТ И ЕГО ПРИМЕНЕНИЕ

Благодаря зрению мы воспринимаем все многообразие красок природы и наблюдаем динамику происходящих вокруг нас явлений. Из пяти органов чувств самым главным в познании природы является зрение. Однако видеть окружающий нас мир мы можем лишь потому, что он залит светом.

О том, что такое свет, какова его природа и как человек использует различные свойства света, рассказывает эта статья.

ПРЯМОЛИНЕЙНОЕ РАСПРОСТРАНЕНИЕ СВЕТА

В самом раннем возрасте происходит знакомство со светом. С первых шагов мы убеждаемся, что там, откуда приходит свет, находятся какие-либо предметы. Желая приблизиться к одному из них, мы направляемся навстречу идущему от него свету. Путь при этом оказывается кратчайшим — прямой линией. Самое понятие прямой линии, видимо, возникло из наблюдения за распространением солнечного луча.

Свет от источника в однородной среде распространяется во все стороны по прямым линиям.

Прямолинейное распространение света является одним из первых законов природы, с которыми познакомился человек.

Закон прямолинейного распространения света позволяет уяснить причину образования тени. В этом легко убедиться самому, расположив непрозрачный предмет вблизи освещенной стены.

Тени отбрасывают все непрозрачные тела, расположенные на пути лучей света. Лучи же, скользящие по контурам предмета, обрисовывают его тень.

По очертанию тени можно судить о форме предмета, отбрасывающего тень.

Из глубины веков дошел до нас теневой театр. На экране движутся, жестикулируют темные силуэты людей и кукол — это тени находящихся за экраном актеров или специальных плоскостных марионеток, которыми управляют актеры.

Но форма тени иногда бывает обманчивой. Сложите кисти обеих рук тыльной стороной.

Мизинцы и указательные пальцы зацепите друг за друга, безымянные и средние отогните, а большой палец, находящийся сверху, примкните к указательным. Сложенные таким образом пальцы рук поднесите к освещенной стене, и вы увидите тень, напоминающую своими очертаниями зайца.

Тень от предмета на фотографии, снятой с самолета, позволяет представить предмет не только сверху, но и сбоку.

По длине тени, отбрасываемой каким-либо предметом, и ее положению можно судить о времени дня. Тень в глубокой древности служила стрелкой солнечных часов — пожалуй, самых простых из всех существующих.

Наиболее короткими тени бывают в полдень, когда солнце находится в зените, и самыми длинными — в часы заката.

На основании закона прямолинейного распространения света построен один из первых оптических приборов — камера-обскура. Вы сами можете легко смастерить этот прибор.

Для этого склейте из картона или плотной бумаги прямоугольный ящик. В одной из граней проколите небольшое отверстие, а противоположную грань замените матовым стеклом — и камера-обскура готова. На матовом стекле можно наблюдать изображение хорошо освещенного предмета, находящегося перед отверстием камеры.

Пусть вас не удивляет, что изображение на стекле будет перевернутым. Лучи света, распространяющиеся прямолинейно от верхней части предмета, проходя через отверстие, попадают в низ противоположной грани, а от нижней грани предмета — вверх. Поэтому изображение на экране окажется перевернутым. Не огорчайтесь также и тем, что изображение получится не очень светлым (рис. 1, *а*). Это происходит потому, что отверстие в камере вы сделали маленьким. Но не торопитесь его увеличить! При большем отверстии изображение становится светлее, но теряет резкость (рис. 1, *б*).

С этими двумя исключающими друг друга свойствами камеры-обскуры столкнулись уже первые пользовавшиеся ею исследователи.

Первые упоминания о камере-обскуре относятся к XIII в.

Естественную камеру-обскуру можно наблюдать, находясь в тени дерева. Свет, проходя сквозь малые отверстия между листьями, создает на поверхности Земли (которая в данном случае является экраном) изображение Солнца. Если же просветы между листьями велики, то световые пятна передают не изображение Солнца, а форму просветов. Это можно проследить, наблюдая на полу или стене свет от электрической лампочки, прошедший через два отверстия разных размеров в листе плотной бумаги. Свет, который проходит через малое отверстие, образует изображение нити накала, при бо́льших же размерах отверстия получится изображение самого отверстия.

Особенно важно то, что закон прямолинейного распространения света позволяет обосновать закон освещенности поверхности в зависимости от расстояния до источника света.

Пусть, например, свет от источника падает на квадратный экран, расположенный от него на некотором расстоянии. Если увеличить расстояние вдвое, мы обнаружим, что этот же свет освещает экран, сторона которого вдвое больше прежнего, а поверхность, следовательно, вчетверо больше. При утроенном расстоянии поверхность увеличится в девять раз. Количество света, которое приходится на единицу поверхности экрана, при увеличении расстояния от источника убывает обратно пропорционально квадрату этого расстояния.

Действие прибора для сравнения силы света двух источников основано именно на этом законе. Такие приборы называют фотометрами. Если два источника освещают одинаково какую-либо площадку, то силы посылаемого ими света относятся друг к другу, как квадраты их расстояний до экрана.

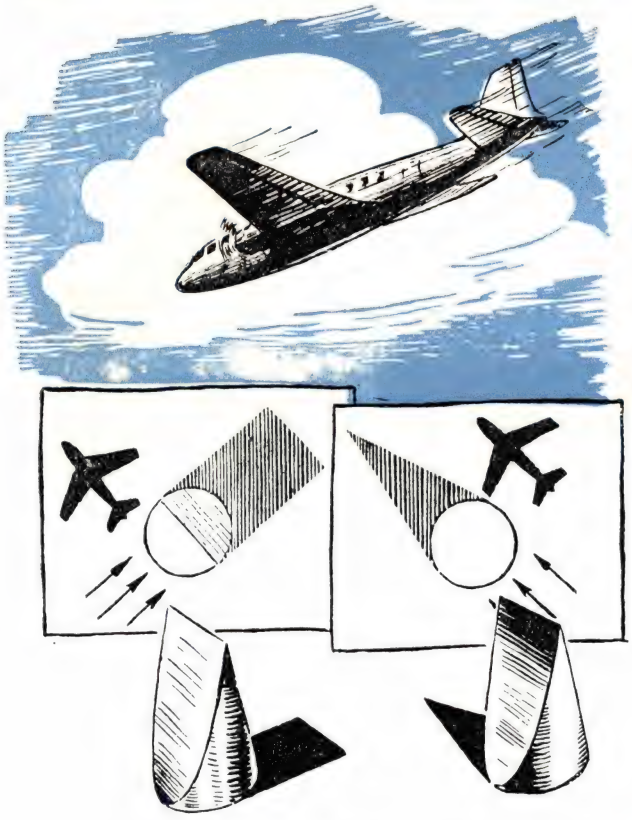
Закон прямолинейного распространения света позволяет ответить на вопрос о том, от чего зависят видимые размеры предметов. Лучи, которые попадают в глаз наблюдателя от крайних точек предмета, образуют между собой угол. Этот угол называют **углом зрения**. Если угол зрения мал, то изображение в глазу получается малых размеров и мы считаем, что наблюдаемый предмет тоже мал или удален от наблюдателя.

ЗАКОН ОТРАЖЕНИЯ СВЕТА

Отражение света от гладкой поверхности было замечено так давно, что трудно выяснить, когда и кем был установлен закон отражения.

Впервые люди заметили эту особенность света, очевидно, наблюдая водную гладь водоемов.

Еще не умея объяснить явление отражения, но уже зная условия, при которых оно возни-



По форме тени на аэрофотоснимках можно судить о предмете, но нужно быть внимательным к тому, с какой стороны освещен предмет.

кает, люди воспользовались им для изготовления искусственных зеркал.

Первые зеркала были изготовлены задолго до нашей эры в Египте. Они были сделаны из меди и золота. Римляне использовали для этого бронзу. Зеркало из стекла, покрытого с одной стороны свинцом, вошло в употребление только в XIII в. Затем, спустя сто лет, стекло стали покрывать амальгамой из олова и ртути. В настоящее время зеркала для точных приборов делают, нанося слой серебра или алюминия на шлифованную поверхность стекла методом катодного распыления.

Что же такое зеркало?

Зеркалом называют поверхность, правильно отражающую пучок световых лучей.

Отражение считается правильным тогда, когда весь пучок отражается под тем же углом, под которым он падает на поверхность.

Если поверхность шероховатая, то она встречает падающий на нее пучок света под различными углами и соответственно под разными углами отражает его. Такое отражение называют рассеянным.

Рассеянное отражение дает, например, матовое стекло.

Угол между падающим лучом и перпендикуляром к зеркалу в месте его падения равен углу, который образует с этим перпендикуляром отраженный луч. Луч падающий, отраженный и перпендикуляр к зеркалу лежат в одной плоскости.

Если отражающая поверхность плоская, то изображение, подобно самому предмету, расположено по отношению к зеркалу симметрично. Само понятие симметрии возникло из наблюдений отражения предметов в плоском зеркале. Отражающую плоскость называют плоскостью симметрии.

Иная картина наблюдается в том случае, если зеркало кривое. Изображение в этом случае искажено. Зеркала, поверхности которых не плоские,

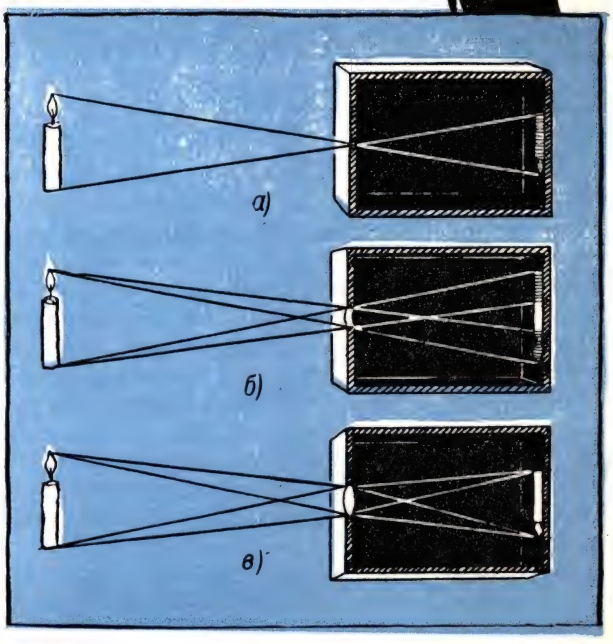
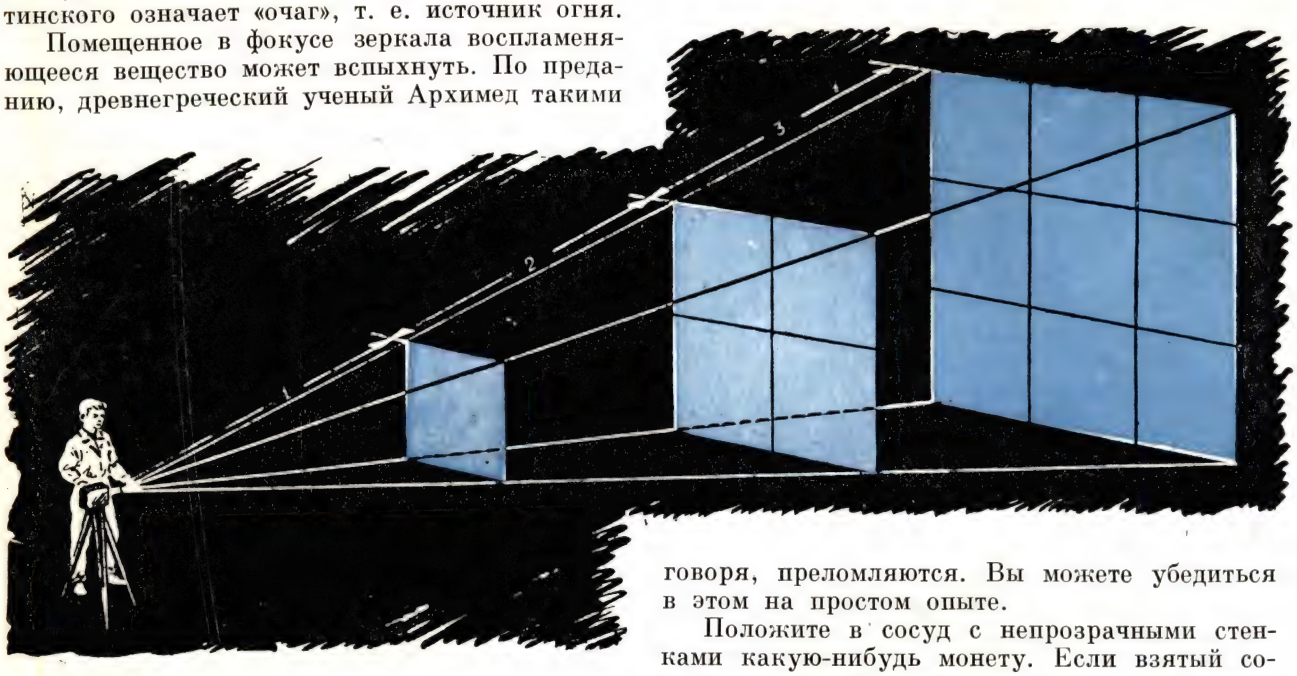


Рис. 1: а) изображение предмета при малом отверстии в камере-обскуре; б) при значительном отверстии изображение теряет резкость; в) если в отверстие поместить собирательную линзу, изображение становится четким.

иногда чрезвычайно забавно искажают предмет.

Особое внимание древних привлекало зеркало, отражающей поверхностью которого являлась внутренняя поверхность сферы. Такое зеркало собирает лучи солнца в одну точку. Эту точку называют фокусом, что в переводе с латинского означает «очаг», т. е. источник огня.

Помещенное в фокусе зеркала воспламеняющееся вещество может вспыхнуть. По преданию, древнегреческий ученый Архимед такими зеркалами сжег римский флот. Несостоятельность этого предания не в том, что вообще невозможно сжечь флот с помощью зеркал, а в том, что зеркала должны были быть очень больших размеров, чтобы фокусы оказались на значительном расстоянии от их поверхностей.



Освещенность поверхности обратно пропорциональна квадрату расстояния от поверхности до источника света.

Отражение — очень важное явление. Именно благодаря отражению мы можем видеть несветящиеся тела. Свет от источника (например, от Солнца) падает на предмет и, отражаясь от него, попадает в наш глаз. Мы видим предмет.

ПРЕЛОМЛЕНИЕ СВЕТА

Свет, падающий на границу двух прозрачных сред, не только отражается, но может частично проходить во вторую среду.

Так, свет, падающий на поверхность воды, не только отражается ее поверхностью, но и проходит в воду. Благодаря этому мы, например видим дно реки, плавающих в воде рыб и т.д.

Итак, рассмотрим явление перехода света из одной среды в другую.

Падая на границу раздела двух сред, световые лучи меняют свое направление, иначе говоря, преломляются. Вы можете убедиться в этом на простом опыте.

Положите в сосуд с непрозрачными стенками какую-нибудь монету. Если взятый сосуд прозрачен, то его можно загородить непрозрачным телом, как на рис. 2. Поставьте сосуд на стол и отойдите от него на такое расстояние, чтобы монета, лежащая в нем, не была видна. Заметьте место, где вы стоите, и, вернувшись к столу, понемногу наливайте в сосуд воду. При некотором уровне воды в сосуде вы обнаружите, что монета стала видна с того самого места, откуда раньше ее видно не было. В чем же тут дело? А вот в чем. Когда в сосуде воды еще не было, вы выбрали такое положение, при котором все лучи, отраженные от монеты, распространяясь прямолинейно, не попадали в ваш глаз. Когда же в сосуд налили воду, некоторая часть лучей, отраженных монетой, преломившись на границе воды и воздуха, получила такое направление, что лучи попали в ваш глаз и вы увидели монету.

Очень интересное природное явление, состоящее в том, что Солнце можно видеть даже тогда, когда оно уже скрылось за горизонтом, объясняется преломлением солнечных лучей в атмосфере Земли.

Преломлением световых лучей объясняются

многие явления природы, например: почему глубина ручья кажется нам меньше действительной; почему предметы, рассматриваемые через стеклянный шар с водой, кажутся увеличенными; почему при помощи стеклянного шара с водой можно зажечь огонь, хотя при этом вода в сосуде остается холодной; почему шар, изготовленный из льда, тоже будет собирать свет в точку и зажигать огонь, а сам при этом не растает.

Многовековые наблюдения над поведением луча света при переходе из воздуха в воду и стекло позволили выяснить, что угол, который образует преломленный луч с перпендикуляром к разделяющей поверхности в точке падения светового луча, меньше, чем угол падения.

Знание закона преломления даже в такой общей форме позволило уяснить поведение лучей света при прохождении через стеклянную пластинку с параллельными гранями, трехгранную призму, собирающие и рассеивающие линзы. И если причина большего или меньшего преломления была еще не ясна, то сам факт преломления позволил расположить известные прозрачные вещества по степени преломляемости в них света.

Было установлено, что различные сорта стекол по-разному преломляют свет. Для увеличения преломления были даже найдены необходимые примеси, которые стали добавлять в стекло при его изготовлении.

Особенностью в поведении света при прохождении через собирающую линзу воспользовались для того, чтобы усовершенствовать камеру-обскуру. В отверстие камеры-обскуры поместили собирающую линзу, и неясное изображение стало резким (рис. 1, *в*). Это усовершенствование было сделано в конце XVI в. Камера-обскура, отверстие которой закрыто собирающей линзой, представляет собой фотоаппарат.

Однако фотографировать научились значительно позднее, лишь спустя три столетия, когда было открыто химическое действие света на эмульсию бромистого серебра.

Весьма точные измерения углов падения и углов преломления, которые образуют лучи света с перпендикуляром к поверхности раздела в месте падения, произвел еще Птолемей. Однако установить соотношение между ними ему не удалось.

Лишь в XVII в. ученые смогли сформулировать более точно законы преломления света.

Голландский математик В. Снеллиус утверждал, что отношение косекансов углов падения и преломления для двух данных сред остается величиной постоянной.

В 1637 г. Р. Декарт независимо от него обнаружил, что отношение синусов углов падения и преломления для данной границы раздела сред остается величиной постоянной:

$$\frac{\sin\alpha}{\sin\beta} = \text{const (величина постоянная)}.$$

При этом оказалось, что значение постоянной зависит от того, из какой среды падает луч света на поверхность раздела.

Если, например, луч света переходит из воздуха в воду, то постоянная в законе Снеллиуса—Декарта равна $\frac{4}{3}$. При переходе луча в обратном направлении постоянная равна $\frac{3}{4}$.

Величину постоянной в каждом отдельном случае можно вычислить по отношению синусов углов падения и преломления. При этом, однако, оставался неясен ее физический смысл.

Открытие закона преломления даже в таком виде позволило Декарту дать правильное толкование явления радуги как преломления света в каплях дождя.

Но цветность радуги оставалась в то время еще загадочной.

НЬЮТОН И ГЮЙГЕНС О ПРИРОДЕ СВЕТА

С древних времен о природе света высказывались самые разнообразные суждения.

Но ни одно из них не могло быть признано удовлетворительным, потому что не объясняло всего многообразия световых явлений.

Теория световых явлений прежде всего должна была обосновать такие прочно установленные законы, как прямолинейное распространение, отражение и преломление света.

Предшественники Ньютона полагали, что лучи света исходят не от светящихся тел, а из глаз: глаза лучами, как щупальцами, ощупывают предметы. Такое предположение легко опровергнуть: ведь если бы это было так, замечают древние критики, то можно было бы одинаково хорошо видеть как при свете, так и в темноте.

Ньютон, объясняя различные оптические явления, исходил из аналогии в поведении лучей света и потока быстро летящих маленьких частиц — корпускул, излучаемых светящимся телом. Эта аналогия позволила Ньютону теоретически обосновать основные законы: прямолинейного распространения, отражения и преломления света.

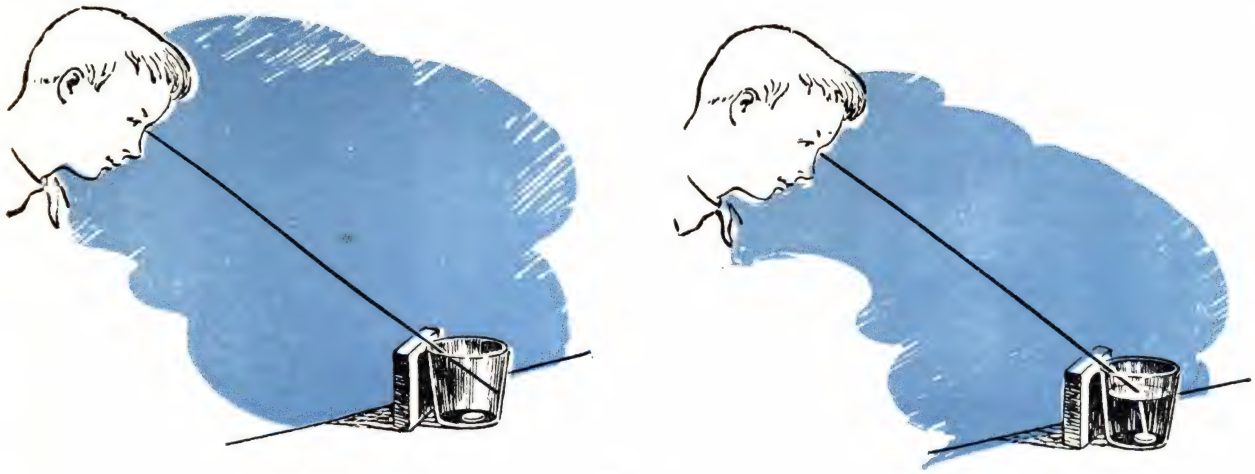


Рис. 2.

Взгляды Ньютона на природу света впоследствии стали называть корпускулярной теорией.

По мнению Ньютона, закон прямолинейного распространения света является следствием закона инерции: лучи света, исходя из светящихся тел, подобно корпускулам, на которые не действуют никакие силы, движутся равномерно и прямолинейно.

Отражение света, по Ньютону, подчиняется закону упругого удара корпускул о границу раздела сред, при котором угол падения равен углу отражения.

Преломление света на границе раздела Ньютон объяснял изменением той составляющей скорости корпускул, которая перпендикулярна к поверхности раздела.

Таким образом, причина преломления света на границе двух сред лежит в различии скоростей распространения света в различных средах. Если, например, составляющая скорости корпускулы, перпендикулярная к поверхности раздела, во второй среде возрастает, то направление результирующей скорости образует с перпендикуляром к границе раздела угол, меньший угла падения. Если же составляющая скорости уменьшается, то угол преломления при этом становится больше угла падения.

Из геометрических соображений (рис. 3) находим:

$$\frac{\sin \alpha}{\sin \beta} = \frac{v_2}{v_1},$$

где α — угол падения, β — угол преломления, v_1 и v_2 — скорость света в первой и второй средах.

По теории Ньютона, угол преломления будет меньше угла падения, если скорость света во второй среде больше, чем в первой.

Современник Ньютона Христиан Гюйгенс не отвергал существования корпускул. Но он полагал, что они не излучаются светящимися телами, а заполняют все пространство. Процесс распространения света он мыслил не как поступательное движение, а как последовательный процесс передачи удара одной корпускулы о другую.

Сторонники Гюйгенса высказывали мнение, что свет представляет собой распространяющееся колебание в особой среде — эфире, которым заполнено все мировое пространство и который свободно проникает во все тела. Световое возбуждение от источника света передается эфиром во все стороны.

Так возникли первые волновые представления о свете.

Основную ценность волновой теории представляет принцип, первоначально сформулированный Гюйгенсом, а затем развитый О. Френелем.

Принцип Гюйгенса — Френеля утверждает, что каждая точка, до которой дошло световое возбуждение, в свою очередь становится центром вторичных волн и передает их во все стороны соседним точкам.

Точки, до которых дошли колебания в один и тот же момент времени, образуют ф р о н т в о л н ы. Расстояние, на которое перемещается фронт волны за время, равное периоду колебаний, называют д л и н о й в о л н ы. Направление распространения волны определяется перпендикуляром к ее фронту. Таким образом, точки, отстоящие друг от друга

на расстоянии, равном длине волны, по направлению ее распространения колеблются в одинаковых фазах.

Волновая теория полагает, что в различных средах упругие свойства эфира изменяются, а поэтому скорость распространения света в каждой среде своя. При переходе волны из одной среды в другую вследствие изменения скорости происходит преломление (рис. 4).

Закон преломления, согласно волновой теории, выражается формулой

$$\frac{\sin \alpha}{\sin \beta} = \frac{v_1}{v_2}.$$

Сопоставляя результат волновой теории света с тем результатом, который дает корпускулярная, видим, что волновая теория в законе преломления дает обратную величину для значения постоянной. Это означает, что если скорость распространения света во второй среде больше, то угол преломления будет не меньше, а больше угла падения.

Чтобы ответить на вопрос о том, какая из теорий дает правильный ответ, надо было произвести измерения скорости света в различных средах. Измерение скорости света оказалось

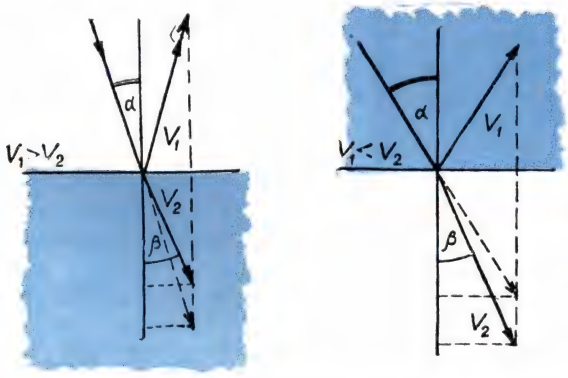


Рис. 3. Отражение и преломление света по Ньютону.

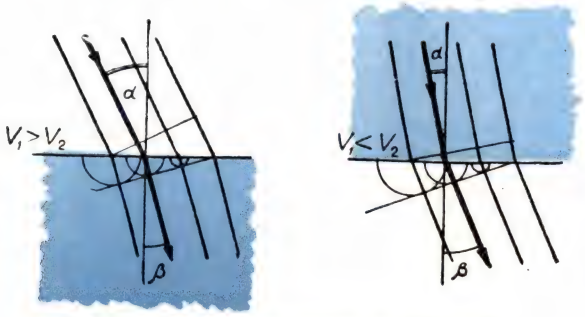


Рис. 4. Преломление света по Гюйгенсу.

весьма сложной задачей, так как скорость распространения света очень велика. Поэтому многие попытки исследователей не увенчались успехом.

ПЕРВОЕ ИЗМЕРЕНИЕ СКОРОСТИ СВЕТА

Остроумное решение сложной задачи определения скорости света было найдено в 1676 г. датским астрономом Олафом Ремером.

Олаф Ремер, наблюдая движение спутников Юпитера, заметил, что во время затмения спутник выходит из области тени периодически запаздывая. Ремер объяснял это тем, что к моменту очередного наблюдения Земля находится в иной точке своей орбиты, чем в предыдущий раз, и, следовательно, расстояние между ней и Юпитером иное. Максимальная величина, на которую возрастает это расстояние, равняется диаметру земной орбиты. И именно тогда, когда Земля больше всего удалена от Юпитера, спутник выходит из тени с наибольшим запаздыванием.

Сопоставив эти данные, Ремер пришел к выводу, что свет от спутника проходит расстояние, равное диаметру земной орбиты — 299 106 тыс. *км* в 1320 сек. Такой вывод не только убеждает в том, что скорость распространения света не может быть мгновенной, но и позволяет определить величину скорости; для этого надо разделить величину диаметра орбиты Земли на время запаздывания спутника.

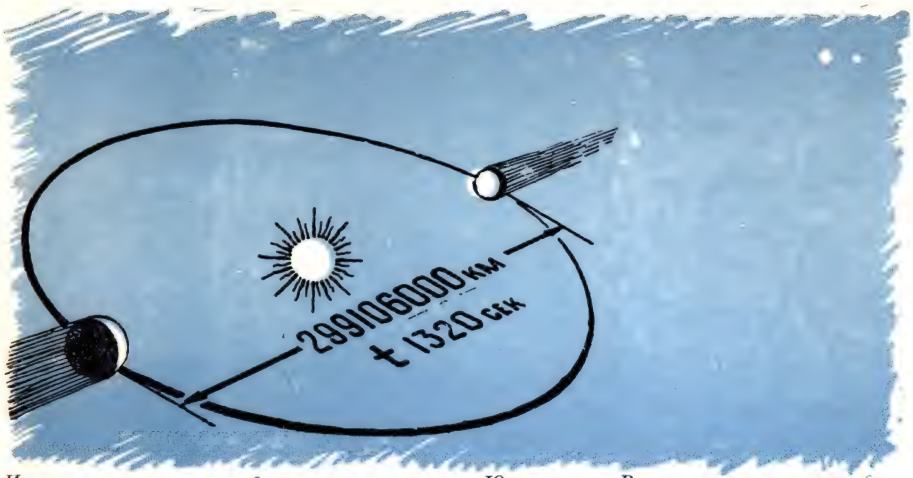
По вычислениям Ремера, скорость распространения света оказалась равной 215 тыс. *км/сек*.

Последующие, более совершенные методы наблюдения за временем запаздывания спутников Юпитера позволили уточнить эту величину. Скорость распространения света, по современным данным, равна 299 998,9 *км/сек*. Для практических расчетов принимают скорость света в вакууме равной 300 тыс. *км/сек*. Огромная величина скорости света ошеломила не только современников Ремера, но и послужила поводом для отрицания корпускулярной теории света.

Если свет представляет собой поток корпускул, то при такой скорости движения энергия их должна быть очень велика. Удары корпускул при падении на тела должны быть ощутимы, т. е. свет должен оказывать давление!

Следующим после Ремера скорость света измерил Джемс Брадлей.

Переезжая однажды через р. Темзу, Брадлей обратил внимание на то, что во время дви-



Измеряя время запаздывания спутника Юпитера, Ремер вычислил скорость света.

жения лодки ветер дул как будто по другому направлению, чем это было на самом деле. Это наблюдение, вероятно, и дало ему основание объяснить аналогичным явлением кажущееся движение неподвижных звезд, называемое аберрацией света.

Свет звезды достигает Земли подобно тому, как капли отвесно падающего дождя падают на окна движущегося вагона. Движение луча света и движение Земли складываются.

Следовательно, чтобы свет от звезды, расположенной перпендикулярно к плоскости движения Земли, попадал в телескоп, его необходимо наклонить на некоторый угол, который зависит не от расстояния до звезды, а только от скорости света и скорости движения Земли (она была в то время уже известна — 30 *км/сек*).

Измерив угол, Брадлей нашел, что скорость света равна 308 тыс. *км/сек*. Измерения Брадлея, как и Ремера, не разрешали спорного вопроса о значении постоянной в законе преломления, так как Брадлей и Ремер определяли скорость света не в какой-либо среде, а в космическом пространстве.

Идею нового метода измерения скорости света предложил Д. Араго. Осуществили ее двумя различными способами И. Физо и Л. Фуко.

Физо в 1849 г. тщательно измерил расстояние между двумя пунктами. В одном из них он поместил источник света, а в другом — зеркало, от которого свет должен отразиться и вновь вернуться к источнику.

Для того чтобы определить скорость распространения света, надо было очень точно измерить промежуток времени, который необходим свету для прохождения удвоенного пути от источника до зеркала.

Расстояние от источника, находящегося в предместье Парижа Сюрене, до зеркала, установленного на Монмартре, составляло 8633 *м*. Значит, удвоенное расстояние было равно 17 266 *м*. Время, в течение которого свет пройдет это расстояние, если воспользоваться результатами измерения скорости света Ремера, будет не более шести стотысячных долей секунды.

Средств для измерения столь малых промежутков времени тогда не было.

Значит, эти измерения следовало исключить из опыта.

В Сюрене была установлена зрительная труба, направленная на Париж. Сбоку через другую трубку поступал свет от источника. От поверхности прозрачной стеклянной пластинки, расположенной в трубке под углом в 45°, свет частично отражался по направлению к Парижу.

В Париже на Монмартре была установлена другая зрительная труба, в которую попадал свет, отраженный прозрачной пластинкой.

Глядя в окуляр, можно было видеть источник света, расположенный за боковой трубкой. Окуляр трубы, установленной на Монмартре, был заменен зеркалом, благодаря чему свет возвращался в Сюрен.

Отраженный зеркалом на Монмартре свет, встречая на обратном пути внутри трубы прозрачную стеклянную пластинку, частично отражался от ее поверхности, а свет, прошедший через пластинку и окуляр трубы, попадал в глаз наблюдателя.

Такое устройство позволяло наблюдателю видеть в окуляре зрительной трубы свет от источника, который поступал через боковую трубку.

Зрительная труба в Сюрене, кроме боковой трубки, через которую поступал свет, имела прорезь в том месте, где располагался фокус объектива и окуляра. Сквозь прорезь проходило зубчатое колесо, которое приводилось в движение часовым механизмом. Когда колесо было неподвижно и установлено так, что свет проходил между зубцами, то в окуляре трубы был

виден свет, отраженный от зеркала на Монмартре.

Когда колесо было приведено в движение, свет исчез. Произошло это в тот момент, когда свет, прошедший между зубцами колеса по направлению к Парижу, встретил на обратном пути зубец, а не промежуток между зубцами.

Для того чтобы свет в окуляре появился вновь, необходимо было удвоить число оборотов колеса.

При дальнейшем увеличении числа оборотов свет вновь исчез.

В опытах Физо зубчатое колесо имело 720 зубцов. Первое исчезновение света наблюдалось, когда колесо совершало 12,67 оборота в секунду.

Один оборот оно делало за время, равное $\frac{1}{12{,}67}$ сек. При этом промежуток между зубцами сменялся зубцом. Если зубцов 720, то промежутков тоже 720. Следовательно, смена происходит за время, равное $\frac{1}{12{,}67 \cdot 2 \cdot 720} = \frac{1}{18245}$ сек.

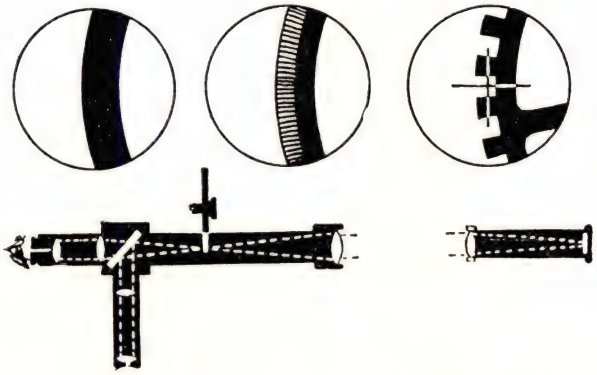
За это время свет проходил удвоенное расстояние от Сюрена до Монмартра.

Следовательно, его скорость была равной 315 тыс. *км/сек*.

Таким остроумным методом удалось избежать измерений малых промежутков времени и все же определить скорость света.

Сравнительно большое расстояние между источником света и зеркалом не позволяло на пути света поместить какую-либо среду. Физо определил скорость света в воздухе.

Скорость света в других средах была определена Фуко в 1862 г. В опытах Фуко расстояние от источника до зеркала было всего в несколько метров. Это позволило поместить на пути света трубку, заполненную водой.



Принципиальная схема опыта Физо.

Фуко установил, что скорость распространения света в различных средах меньше, чем в воздухе. В воде, например, она составляет величину, равную $\frac{3}{4}$ скорости света в воздухе. Полученные результаты разрешили двухвековой спор между корпускулярной и волновой теориями о величине постоянной в законе преломления. Правильное значение постоянной в законе преломления дает волновая теория света.

Измерения скорости распространения света в различных средах позволили ввести понятие оптической плотности вещества.

Оптической плотностью вещества или абсолютным показателем преломления называют отношение скорости распространения света в безвоздушном пространстве к скорости его распространения в любом данном веществе. Эта величина во всех случаях больше единицы, так как скорость распространения света в безвоздушном пространстве больше, чем в любом веществе.

В практике часто оказывается удобным пользоваться относительным показателем преломления, который равен отношению скорости распространения света во второй среде к скорости в первой среде.

ЯВЛЕНИЕ ПОЛНОГО ОТРАЖЕНИЯ

В 1611 г. Иоганн Кеплер опубликовал свою теоретическую работу по оптике.

Изучая преломление света, он нашел, что для стекла угол преломления не превышает 42°. Отсюда он делает вывод, что если свет направить из стекла в воздух под углом, бóльшим 42°, то он не перейдет из стекла в воздух, а целиком отразится.

Открытое Кеплером явление привлекло внимание исследователей, и интерес к нему не ослабевает до настоящего времени.

Полное отражение наступает при углах падения, бóльших некоторого предельного. Предельным углом падения называют такой угол падения, при котором угол преломления становится равным 90°.

Это возможно при переходе света из среды оптически более плотной в среду оптически менее плотную. Относительный показатель преломления в этом случае меньше единицы.

Явление полного отражения широко используется в перископах, биноклях (рис. 5) и других оптических приборах.

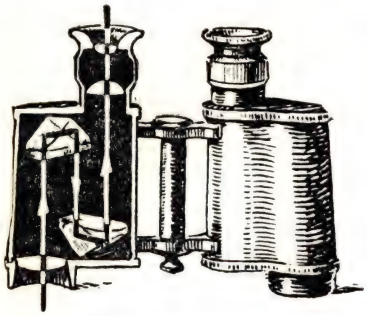
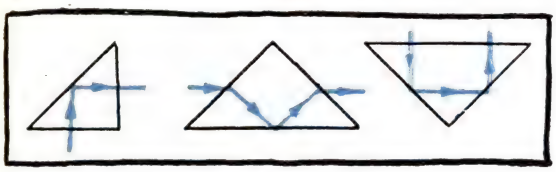


Рис. 5. Явление полного отражения позволяет использовать призму как зеркало для поворота лучей света.



ГОЛУБАЯ ОПТИКА

История голубой, или просветленной, оптики началась с того, что объектив фотоаппарата был собран из старых линз.

Аппарат дал неожиданный эффект. Было обнаружено, что количество света, проходящего через его объектив, значительно больше того, которое пропускает объектив с линзами из свежеизготовленного стекла.

Это заинтересовало исследователей. Внимательное изучение давно изготовленных стекол показало, что со временем стекло стареет и на его поверхности образуется пленка окиси голубого цвета. Окисленная поверхность стекла пропускает света больше, чем неокисленная.

Количество света, отражаемого или пропускаемого поверхностью раздела сред, зависит от величины относительного показателя преломления. Чем меньше относительный показатель преломления отличается от единицы, тем больше света при всех углах падения проникает через поверхность раздела.

Оптическая плотность воздуха, или абсолютный показатель преломления, $n_в=1{,}0$, а оптическая плотность стекла $n_с=1{,}5$. При падении света из воздуха на стекло относительный показатель преломления поверхности раздела воздух — стекло будет равен

$$n - \frac{n_в}{n_с} = \frac{1{,}5}{1{,}0} = 1{,}5.$$

Если на стекле имеется пленка окиси, оптическая плотность которой меньше, чем стекла, то относительный показатель преломления поверхности раздела уменьшается, а это приводит к тому, что такая поверхность меньше отражает свет.

В настоящее время нет надобности годами ждать старения стекла, пока сама собой образуется окисная пленка. При изготовлении стекла для объективов к нему добавляют примеси, которые ускоряют процесс образования окисной пленки.

Еще проще создать просветленный объектив, если на поверхность объектива нанести тонкий слой определенного вещества, по своим свойствам заменяющий пленку окиси.

ВОСПРИЯТИЕ СВЕТА ГЛАЗОМ

Еще в XV в. знаменитый художник и ученый Леонардо да Винчи высказал мысль о том, что мы воспринимаем объемность предметов благодаря тому, что видим мир двумя глазами.

Высказывания Леонардо его современниками были оставлены без внимания. Лишь в 30-х годах XIX в. это открытие было сделано заново английским ученым Уитстоном.

Как же создается зрительное впечатление объемности предмета? Так как глаза находятся на некотором расстоянии друг от друга, то в каждом глазу формируется изображение рассматриваемого предмета под различными углами зрения. Соединение двух изображений от предмета, рассматриваемого под разными углами зрения, в одно создает зрительное впечатление объемности.

Изображения создаются на сетчатке нашего глаза и воспринимаются нервными корешками.

Зрачок глаза подобен отверстию диафрагмы и бывает открыт то больше, то меньше в зависимости от освещения. Отверстие застеклено хрусталиком — «линзой».

При помощи особых мускулов, изменяющих кривизну хрусталика, происходит изменение его фокусного расстояния. Такая «наводка» глаза на различно удаленные предметы называется а к к о м о д а ц и е й глаза.

Радужная оболочка играет роль диафрагмы. Она регулирует, ограничивает световой поток, проникающий через зрачок глаза. Изменение величины зрачка — отверстия радужной оболочки определяет светосилу и глубину фокусировки изображения, которое получается на сетчатке глаза.

Когда фокус хрусталика всегда совпадает с сетчаткой — зрение нормальное. Когда фокус ближе или дальше сетчатки — изображение становится неясным. Тогда фокусировку хрусталика исправляют дополнительными линзами — очками.

Приближая предмет к глазу постепенно, мы видим его все лучше, различая более мелкие его детали. Предмет виден наиболее ясно, если он находится на расстоянии 25 *см* от глаза. Это расстояние называют расстоянием наилучшего зрения.

Световое ощущение возникает при освещении сетчатки глаза. Сетчатка представляет собой светочувствительную ткань, которая выстилает дно глазного яблока. Светочувствительная ткань не что иное, как разветвленная сеть волокон зрительного нерва.

Светочувствительными элементами глаза являются так называемые колбочки и палочки, расположенные в самом нижнем слое сетчатки.

Число колбочек и палочек различно, и расположены они неравномерно. Из 130 млн. палочек бóльшая часть находится у края сетчатки. По мере приближения к центру среди палочек все чаще и чаще встречаются колбочки. Чуть в стороне от оптической оси хрусталика в дне глазного яблока имеется ямка, которая заполнена одними колбочками. Из общего числа в 7 млн. их там находится около 15 тыс. Область вблизи ямки называется желтым пятном.

Желтое пятно позволяет хорошо различать даже самые мелкие детали. Если же изображение предмета получается в самой ямке, то детали видны особенно отчетливо. Поле зрения желтого пятна характеризуется углом, близким по горизонтали к 8°, а по вертикали к 6°. Поле зрения ямки не превышает 1—1,5°. Благодаря способности глазного яблока вращаться поле зрения глаза достигает 150° при достаточно ясном изображении деталей предмета, которые проектируются на желтое пятно.

Наиболее чувствительными к свету являются палочки, но зато колбочки чувствительны к цвету. Поэтому в сумерках, когда освещенность мала, глаз плохо различает цвета.

В зрительном восприятии днем палочки играют менее заметную роль, чем колбочки. Это дало повод различать дневное и сумеречное зрение в зависимости от того, какие чувствительные элементы более способствуют зрительному восприятию в данный момент.

Зрительное ощущение, создаваемое палочками, возникает благодаря имеющемуся на конце палочки пигменту —так называемому зрительному пурпуру. Под действием света он разлагается, раздражая зрительный нерв. Зрительный пурпур красного цвета. Именно поэтому он хорошо поглощает короткие волны видимого спектра, которые преобладают в сумеречном освещении. При сильном освещении он может совершенно разложиться, тогда палочка временно выбывает из строя. Но затем она мало-помалу восстанавливается. Эта особенность позволяет глазу приспосабливаться к перемене освещения.

Чувствительность глаза лежит в очень широких пределах: от $2 \cdot 10^{-10}$ *эрг/сек* до $2 \cdot 10^{2}$ *эрг/сек*.

Зрительное ощущение, создаваемое колбочками (цветное зрение), и до настоящего времени еще недостаточно изучено.

Основная идея объяснения цветного зрения была выдвинута М. В. Ломоносовым. Восприятие любого цвета происходит как восприятие трех основных цветов: красного, зеленого и фиолетового— в различных пропорциях. Впоследствии идеи Ломоносова были развиты в стройную теорию, получившую название трехкомпонентной теории зрения.

ЗРИТЕЛЬНЫЕ ТРУБЫ

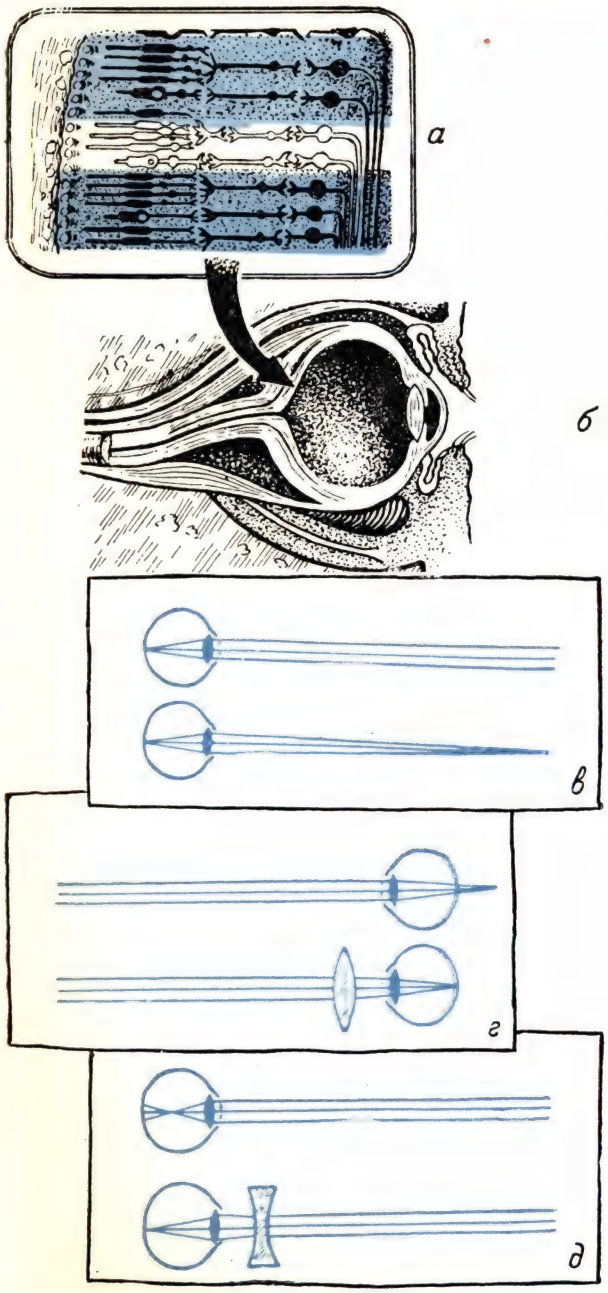
Предмет нельзя видеть, если он помещен очень близко к самому глазу или, наоборот, если он находится слишком далеко. Эта особенность глаза была известна еще в глубокой древности.

В первом случае очень легко выйти из положения: нужно только отодвинуть предмет на некоторое расстояние от глаза. Но как быть в тех случаях, когда нет возможности приблизиться к предмету?

О том, что в глубокой древности умели видеть далекие предметы и различать их детали, свидетельствует одно арабское предание. Согласно этому преданию, в Александрии, расположенной на Средиземноморском побережье Африки, на маяке стояло огромное зеркало,

Книгу при чтении следует помещать на расстоянии наилучшего зрения.

которое позволяло видеть корабли, отплывавшие от берегов Греции. Если не подвергать предание сомнению, то, видимо, на маяке в Александрии находилось вогнутое зеркало и линза. Такой прибор давал возможность разглядеть корабли если не у берегов Греции, то во всяком случае на дальнем горизонте.



Строение человеческого глаза: а — светочувствительные элементы глаза; б — строение глаза; в — нормальное зрение; г, д — зрение, исправленное дополнительными линзами.

В начале XVII в. из Голландии распространился слух о том, что при помощи стекол можно видеть далекие предметы.

Трудно сказать, у кого позаимствовали эту идею смелые купцы Голландии, бороздившие на парусных судах воды морей и океанов в поисках новых путей в неведомые страны.

В 1608 г. правительство Голландии получило несколько заявок с просьбой выдать патент на зрительную трубу. Патент, однако, никому из претендентов выдан не был.

В 1609 г. Галилей, услышав об этом изобретении, стал размышлять над устройством подобной трубы и вскоре построил зрительную трубу. Схема трубы Галилея до сих пор применяется в некоторых схемах биноклей. Направив свою зрительную трубу на небо, Галилей с ее помощью сделал много удивительных открытий, подтверждающих справедливость учения Коперника.

В 1610 г. в Венеции вышел его трактат.

Этот трактат имел величавое заглавие: «Звездный вестник, возвещающий о великих и удивительных зрелищах и предлагающий их вниманию философов и астрономов, каковы наблюдаемы были Галилео Галилеем с помощью недавно изобретенной им зрительной трубы на лике Луны, в бесчисленных неподвижных звездах, в Млечном Пути, в туманных звездах, в особенности же при наблюдении четырех планет, обращающихся вокруг Юпитера, в различные промежутки времени с удивительной скоростью, планет, которые до последнего времени никому не были известны и которые автор совсем недавно открыл первый и решил назвать Медицейскими светилами».

Это далеко не полный перечень астрономических наблюдений, выполненных Галилео Галилеем с помощью изобретенной им трубы меньше чем за один год!

Каково же устройство построенного им удивительного инструмента, при помощи которого можно видеть далекие миры в глубинах Вселенной?

Труба Галилея состоит из двух линз — собирающей и рассеивающей. Обе линзы заключены в трубку, ограждающую их от постороннего света.

Собирающая линза, обращенная к предмету, создает его уменьшенное изображение. Прежде чем получается изображение, лучи попадают на рассеивающую линзу, которая изменяет их направление. Поэтому предмет кажется наблюдателю больше и расположенным бли-

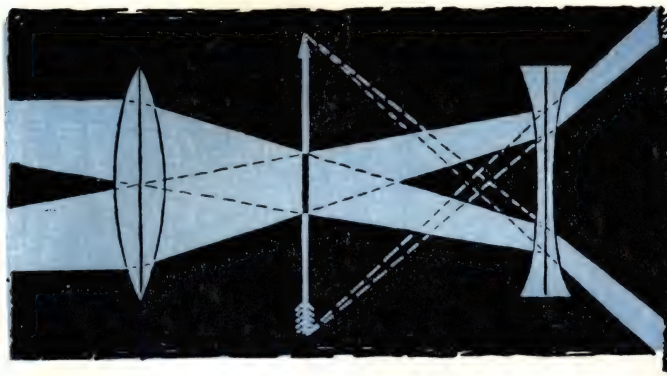
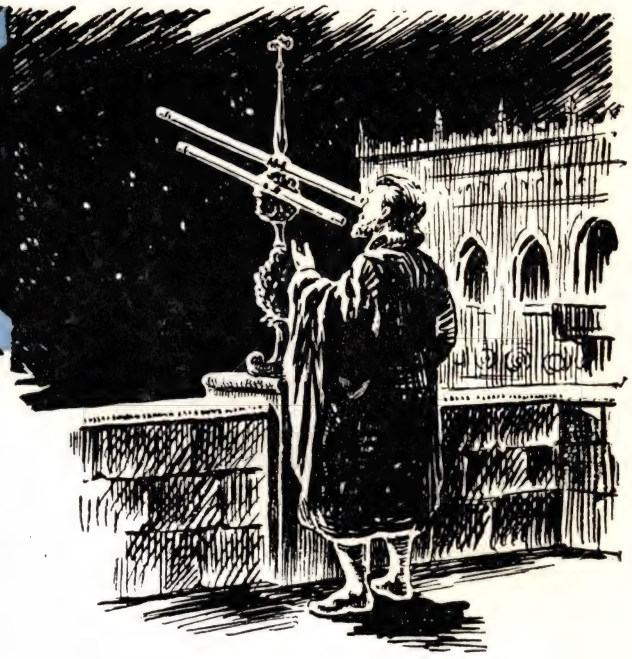


Схема трубы Галилео Галилея.



же. Длину трубы можно изменять в зависимости от особенностей глаза наблюдателя и удаленности рассматриваемого предмета. Труба Галилея очень проста. Ее может смастерить каждый, у кого есть две линзы—выпуклая и вогнутая. Трубу лучше всего делать составной, из двух труб. Одна труба должна входить в другую и относительно свободно в ней перемещаться. Это позволит легко изменять расстояние между линзами.

Спустя год после выхода трактата Галилея, в 1611 г., Иоганн Кеплер в своей книге по оптике дал описание зрительных труб иного устройства, чем труба Галилея. Труба Кеплера состоит из двух выпуклых линз: одна создает обратное действительное изображение предмета, а другая играет роль увеличительного стекла, при помощи которого это изображение рассматривается.

Изображение рассматриваемого предмета в трубе Кеплера перевернутое, что является недостатком по сравнению с трубой Галилея. Но она имела и несомненное преимущество, которое и самому Кеплеру не было известно. Оно было обнаружено лишь 30—40 лет спустя после изобретения трубы. Если в том месте, где получается изображение, даваемое первой линзой, поместить шкалу и рассматривать изображение совместно со шкалой, то это позволит определить геометрические размеры изображения и вычислить размеры самого предмета.

В 1645 г. Ширль ввел в трубу дополнительные линзы, благодаря которым стало возможным видеть предметы неперевернутыми. Линзу, обращенную к предмету, Ширль назвал объективом, а обращенную к наблюдателю — окуляром.

Усовершенствованная труба получила название земной зрительной трубы.

«НОЧЕЗРИТЕЛЬНАЯ» ТРУБА ЛОМОНОСОВА

Спустя более ста лет, в 1761 г., произошло сравнительно редкое и очень кратковременное небесное явление: планета Венера проходила между Землей и Солнцем, проектируясь на его поверхности.

В предвычисленный час на светлом диске Солнца появился крохотный движущийся диск Венеры. Когда он подошел к краю солнечного диска, вокруг него появился розовый венец. М. В. Ломоносов, наблюдая это явление при помощи изобретенной им «ночезрительной» трубы, заключил, что «Венера окружена знатной воздушной атмосферой, таковою (лишь бы не большею), какова обливается около нашего шара земного». Об этом ясно свидетельствовала розовая каемка вокруг темного диска, когда он находился вблизи края Солнца. В это мгновение можно было заметить лучи солнечного света, которые преломлялись, проходя через атмосферу Венеры.

ЗЕРКАЛЬНЫЙ ТЕЛЕСКОП-РЕФЛЕКТОР ИСААКА НЬЮТОНА

Чума, свирепствовавшая в Англии в течение 1664—1667 гг., заставила молодого ученого Исаака Ньютона переехать из Лондона домой,

в деревню Вульсторп, неподалеку от города Грэнтхэма. Здесь он с увлечением занялся экспериментальными оптическими исследованиями. Для этой цели он приобрел простейшие оптические приборы: увеличительные стекла и призмы.

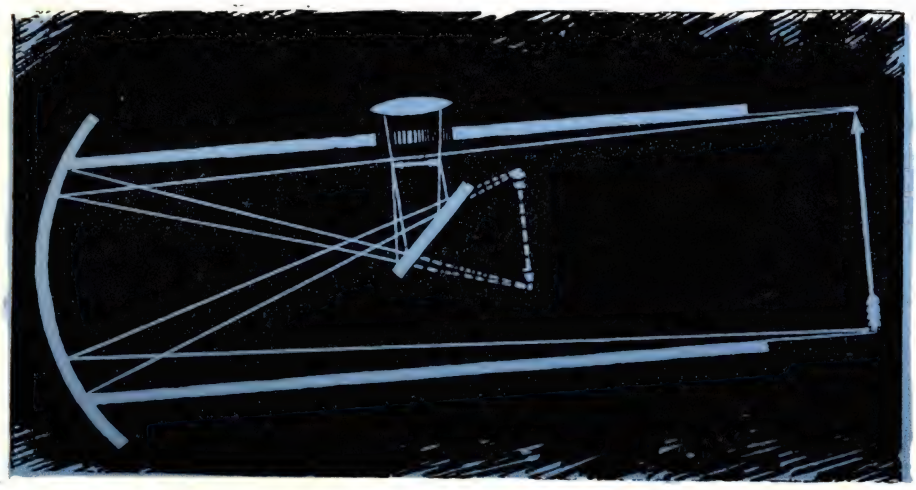
Наблюдать предметы через стекла с выпуклыми и вогнутыми поверхностями в то время было своеобразной модой.

Но предметы сквозь выпуклое стекло представлялись нечеткими, края были слегка размыты и окрашены радужными цветами. Причина этого, как полагали многие, заключалась в том, что поверхность стекол была несовершенной формы и шлифовки. Желая устранить оба недостатка, Ньютон с присущим ему упорством принялся отыскивать соответствующие формы стекла и совершенные методы полировки. В этом смысле он достиг успеха, но недостатка устранить не сумел. Раздумывая над неудачей, он пришел к выводу, что причина несовершенства сферических стекол кроется в другом.

Убежденный в принципиальной неустранимости недостатков выпуклых и вогнутых стекол, он занялся изготовлением зрительной трубы, которая отличалась от распространенных в то время труб.

В новой трубе, изобретенной Ньютоном в 1671 г., выпуклые стекла были заменены зеркалом вогнутой формы, дающим действительное изображение предмета. На пути лучей, создающих изображение предмета, было расположено плоское зеркало. После отражения изображение рассматривалось через увеличительное стекло. Труба-рефлектор по достоинству была оценена учеными того времени.

Схема телескопа-рефлектора Ньютона.



МИКРОСКОП

В то время как Ньютон проводил в родной деревне свои первые опыты, в Голландии уже немолодой А. Левенгук с любопытством рассматривал все, что ни попадалось под руку, через увеличительное стекло. Желание как можно лучше видеть самые мелкие предметы побудило его создать прибор, который увеличивал бы видимые размеры предметов.

Построив прибор, который увеличивал в 160 раз, он обнаружил в грязной капле дождевой воды, взятой из лужи, живые тельца — инфузории. Прибор назвали микроскопом. Так был открыт путь в мир невидимого.

Левенгук изобрел микроскоп в 1665 г., но широкое распространение прибор получил лишь после того, как его в 1667 г. усовершенствовал Роберт Гук. Таким он оставался долгое время. В 1840 г. микроскоп был подвергнут значительной переделке, которую выполнил Амичи. Строгая теория микроскопа была дана Аббе несколько позже — в 1863 г.

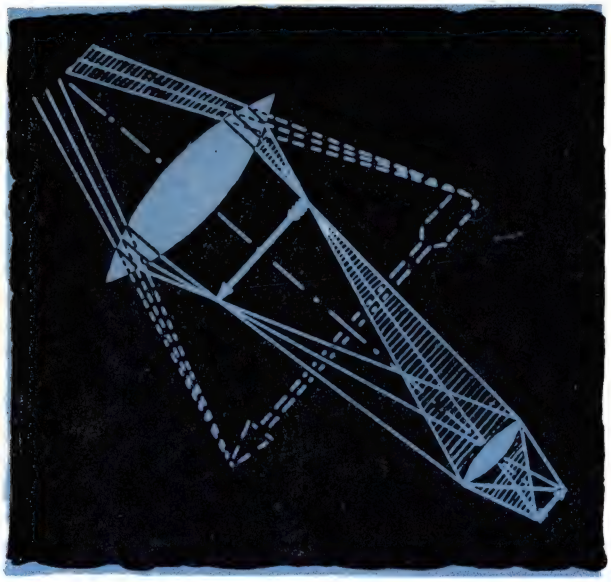
Теория микроскопа позволила выяснить пределы возможного увеличения изображения предмета. Оказалось, что увеличить изображение предмета в обычном свете более чем в 2500 раз нельзя, каким бы совершенным оптическим устройством мы при этом ни пользовались.

ДИСПЕРСИЯ СВЕТА

6 февраля 1672 г. на заседании Королевского научного общества Ньютон сделал сообщение на тему «Новая теория света и цветов». В этом сообщении Ньютон утверждал, что «наиболее удивительная и чудесная смесь цветов — белый свет».

В чем же состояли опыты, которые вызвали много споров на заседании общества и убедительно доказывали утверждение Ньютона? Это были опыты с призмой.

На пути узкого пучка солнечного света, который проникал через узкую щель в ставне, закрывающей окно, Ньютон помещал трехгранную призму. Проектируя изображение щели на экране, он получил не изображение узкой щели,



Принципиальная схема микроскопа.

а растянутую цветную полосу (спектр). Не следует, однако, думать, что Ньютон открыл призматические спектры. О них было известно и до него. Их красотой любовались многие, а стеклянные призмы продавались для развлечения. Но до Ньютона никто не утверждал, что белый свет содержит в себе все цвета спектра.

Явление разложения белого света на составляющие Ньютон назвал дисперсией (от латинского слова, означающего «рассеяние»).

Ньютон полагал, что спектр белого света состоит из семи цветов, причем длина каждого участка спектра может быть точно определена.

Для этой цели он откладывал на прямой отрезок, равный удвоенной длине спектра, и принимал длину удвоенного отрезка за единицу.

Фиолетовый цвет спектра занимал половину длины отрезка. Расстояние от правого конца до синего цвета Ньютон положил равным $\frac{9}{16}$, до голубого $\frac{3}{5}$, до зеленого $\frac{2}{3}$, до желтого $\frac{3}{4}$, до оранжевого $\frac{5}{6}$, до красного $\frac{8}{9}$, а до конца красного, естественно, 1. Приведенные числа определяют длины струн, тона которых образуют минорную гамму:

$$\frac{1}{2} : \frac{9}{16} : \frac{3}{5} : \frac{2}{3} : \frac{3}{4} : \frac{5}{6} : \frac{8}{9} : 1.$$

Эта произвольная шкала была выбрана Ньютоном потому, что цвета, взятые в таких отношениях, так же приятно действуют на глаз, как звуки соответствующих частот на ухо.

Семь основных цветов спектра: красный, оранжевый, желтый, зеленый, голубой, синий и фиолетовый,—взятые в такой пропорции, при смешивании дают белый цвет. Он вращал раскрашенный радужными цветами диск, который воспринимался глазом как белый или, вернее, серый, так как краски обычно бывают не совсем чистых цветов.

Составляющие белого света — лучи одного цвета — призмой уже более не разлагаются. Такой свет называют монохроматическим.

В дальнейшем при изучении явления дисперсии было выяснено, что показатель преломления зависит от длины волны света. Свет более коротких длин волн преломляется призмой больше, чем более длинных.

Следовательно, физический смысл показателя преломления указывает на то, что в любой среде, в том числе и в воздухе, скорость распространения света зависит от длины его волны. Но в воздухе эта зависимость столь незначительна, что ею можно пренебречь и полагать, что в воздухе, как и в вакууме, скорость распространения не зависит от длины волны, т. е. дисперсия отсутствует.

Дисперсией света и объясняется радужная окраска изображений, которые получаются при помощи собирающей линзы. Края линзы, подобно призме, разлагают белый свет на цветные

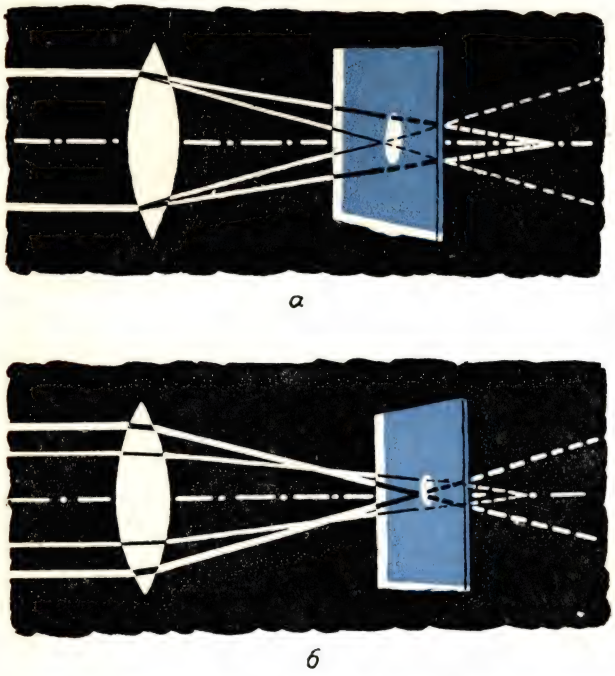


Рис. 6: а) хроматическая аберрация линзы, возникающая вследствие дисперсии света, б) сферическая аберрация, возникающая из-за кривизны поверхности линзы.

составляющие. Поэтому, например, в собирающей линзе фокус фиолетовых лучей расположен ближе к линзе, чем фокус красных.

Этот недостаток, присущий собирающим линзам, называют хроматической аберрацией (рис. 6,*а*).

Хроматическую аберрацию можно значительно уменьшить. Для этой цели собирающую линзу соединяют с линзой рассеивающей, изготовленной из стекла с иным показателем преломления.

Такая сложная линза называется ахроматической.

Открытие дисперсии света позволило понять не одну загадку природы. Стало возможным объяснить, например, явление радуги. Радуга—это дисперсия солнечного света на каплях дождя. Наблюдая брызги фонтана со стороны солнца или повернувшись спиной к солнцу и разбрызгивая воду, можно также увидеть радугу.

Радуга всегда находится напротив солнца, а центр окружности, частью которой является дуга радуги, лежит на продолжении линии, проведенной от солнца через глаз наблюдателя. Радиус этой окружности в угловых мерах всегда один и тот же. Если солнце высоко, то появление радуги невозможно. Чем ниже солнце, тем выше над горизонтом радуга.

Наибольшее световое ощущение достигается, когда луч зрения составляет угол в 42° с направлением лучей солнца. Получается так называемая главная радуга.

В главной радуге внешний край красного цвета, а внутренний — фиолетового. Иногда наблюдается несколько радуг. Если их две, то во второй радуге цвета расположены в обратном порядке. В этом случае луч внутри капли отражается дважды и выходит из капли по направлению, образующему с лучом солнца угол в 52°.

Дисперсией объясняются и многие другие явления природы.

Льдинки, образующиеся на замерзшем стекле, если их осветить, сверкают разноцветными огнями. Наблюдать сверкающие узоры на стекле приходилось, видимо, многим. Но понять сущность этого явления люди смогли только после открытия Ньютона. Многоцветные узоры — результат преломления света в кристалликах льда.

Игра цветов в драгоценных камнях тоже объясняется дисперсией света. Гранение алмаза производят таким образом, чтобы свет, вошедший через одну грань, вышел через другую. Преломляясь на гранях, белый луч разлагается на составляющие его цветные лучи, которые выходят из кристалла под различными углами.

ИНТЕРФЕРЕНЦИЯ СВЕТА

Вряд ли найдется читатель, который бы не развлекался в детстве мыльными пузырями. Мыльные пузыри очень красивы. Они легко парят в воздухе и в лучах солнца переливаются всеми цветами радуги. Цвета не остаются одними и теми же, они все время изменяются. А когда, наконец, становятся темно-лиловыми, пузырь лопается.

На улицах после дождя в небольших лужах или в ручьях близ пешеходных дорожек можно видеть, что поверхность воды украшена радужными полосами. Так бывает, когда вода покрыта очень тонкой пленкой бензина или масла.

Крылья стрекоз тоже переливаются разными цветами.

На поверхности металла при закалке образуются так называемые цвета побежалости. По этим цветам опытные кузнецы определяют необходимое время закалки.

Какова же природа этого многообразия красок?

Будет ли наблюдаться такая же картина, если тонкую пленку освещать не белым, а монохроматическим, например красным, светом?

Оказывается, что многообразие цветов при таком освещении исчезает. Пленка в этом случае оказывается испещренной темными и красными полосами.

Выяснить причину образования темных полос нам поможет опыт, который был поставлен в 1802 г. английским ученым Томасом Юнгом, сторонником волновых представлений о природе света. Юнг направил монохроматический свет от одной освещенной щели на преграду с двумя малыми отверстиями. Эти отверстия служили как бы самостоятельными источниками света. Поскольку эти источники образованы одной и той же световой волной, то естественно, что световые колебания, распространяющиеся от источников, будут находиться в одной фазе. Такие колебания называют когерентными. Если световые колебания от источников достигают какой-либо точки, то в этой точке будет происходить наложение колебаний. Результат сложения будет определяться фазами каждого из пришедших в данную точку колебаний. Если дошедшие колебания будут в одинаковых фазах, то, складываясь, они усилят друг друга, если в разных — то ослабят. Если фазы противоположны, то они погасят друг друга, и точка будет темной. Геометрическое место точек, до которых колебания дошли в противоположных фазах, даст темную линию.

Фазы колебаний, пришедших в данную точку от двух когерентных источников света, зависят от разности расстояний от этих источников до рассматриваемой точки. Разность расстояний от источников до рассматриваемой точки называют разностью хода. Фазы складывающихся колебаний будут одинаковы во всех точках, для которых разность хода равна нулю. Такие точки лежат на перпендикуляре к прямой, соединяющей оба источника. Эта прямая всегда будет светлой. Для всех остальных точек разность хода будет отлична от нуля. Если на длине отрезка, равном разности хода, уложится четное число полуволн, то пришедшие в рассматриваемую точку колебания усилят друг друга, точка будет светлой. Но в тех случаях, когда на длине отрезка, равной разности хода, укладывается нечетное число полуволн, пришедшие в данную точку колебания погасят друг друга, и она будет темной.

Явление сложения когерентных колебаний называют интерференцией, а получающуюся при этом картину — интерференционной.

Когда источники посылают монохроматический свет, то интерференционная картина представляет собой чередование одноцветных и темных полос.

Если же источники посылают белый свет, то каждый из составляющих его цветов дает свою интерференционную картину; складываясь, они придают радужную окраску всей картине.

Рассмотрим теперь, как возникают интерферирующие волны, если тонкую пленку освещать светом от одного источника.

Когда луч света падает на тонкую пленку, то на ее первой поверхности происходит частичное отражение и преломление. Преломленный луч, пройдя толщу пленки, отражается от второй ее поверхности. После отражения от второй поверхности он вновь проходит толщу пленки и падает на первую поверхность с внутренней стороны.

Происходит вторичное преломление, и луч выходит в среду через поверхность пленки. Луч, дважды прошедший толщу пленки, складывается с лучом, отраженным поверхностью пленки. В результате сложения этих лучей в отраженном свете образуется интерференционная картина. Разность фаз между колебаниями, пришедшими в данную точку, зависит от разности хода, которая равна удвоенной длине пути преломленного луча.

Следовательно, результат интерференции зависит от толщины пленки, цветности света, которым она освещается, и угла его падения на поверхность пленки.

Явление интерференции широко используется в приборах, которые называются интерферометрами.

Интерферометры могут служить самым различным целям, например для контроля чистоты обработки поверхности металла.

ДИФРАКЦИЯ СВЕТА

Наблюдая тени, отбрасываемые крупными телами, мы видим резкую границу между светом и тенью. Лучи от источника света прямыми линиями скользят по краям предмета, очерчивая на экране границу тени.

Проходя через отверстие в преграде, свет на экране четко обрисовывает форму отверстия.

Но, если присмотреться внимательно к границе между светом и тенью, можно убедиться, что она никогда резкой не бывает. Тень, отбрасываемая крупными телами, у самого края размыта. Правда, размыта она столь незначительно, что мы этого обычно не замечаем.

Проделайте такой опыт.

В темной комнате укрепите на стене лист белой бумаги и направьте на него узкий яркий пучок света.

Поместите в световой пучок вблизи листа обыкновенную иглу. Игла отбросит на бумагу тень.

Если отодвигать иглу от листа бумаги, тень перестает быть четкой. На границе света и тени появятся темные и радужные полосы.

Лучи света как бы огибают иглу, заходя в область геометрической тени.

Это явление называется дифракцией света. Оно состоит в том, что свет отклоняется от прямолинейного распространения, проходя вдоль края предмета или отверстия.

Явление дифракции наблюдается особенно отчетливо в том случае, когда геометрические размеры тела или отверстия сравнимы с длиной волны света.

При этом не следует упускать из виду, что четкость дифракционной картины зависит и от того, на каком расстоянии от предмета находится экран. В этом легко убедиться на опыте.

Простейшая дифракционная решетка представляет собой стеклянную пластинку, на которой на равных расстояниях нанесены тонкие штрихи. Число штрихов может быть от нескольких единиц до нескольких тысяч на один сантиметр. Толщина штриха и ширина промежутка между ними называется периодом решетки. Наиболее совершенные решетки имеют период около 0,8 микрона.

Если параллельный пучок лучей направить, например, перпендикулярно к плоскости решетки, то, согласно представлениям Френеля, каждый из прозрачных промежутков — щелей — станет самостоятельным источником световых колебаний, распространяющихся по другую сторону решетки по всем направлениям. Если на пути лучей, прошедших решетку, поместить собирающую линзу, то все лучи, идущие от всех щелей под одним и тем же углом к первоначальному направлению, соберутся в фокусе линзы. Непрозрачными промежутками свет будет задержан.

Если они друг друга усиливают, то в фокусе линзы будет свет. Если же они гасят друг друга, то будет темнота.

Рассмотрим дифракцию от каждой щели. В данной точке экрана свет будет в том случае, если колебания, которые создаются волнами от соответствующих точек щели, совпадают по фазам. Это произойдет в направлении, для которого фронты волн будут отстоять друг от друга на расстоянии целого числа длин волн света, освещающего решетку.

Положение фронтов волн, идущих от точек щели, определяется параллельными прямыми, перпендикулярными к параллельным лучам. Если a — ширина каждого из прозрачных промежутков, b — расстояние между ними, то $a+b=d$ является периодом решетки. Расстояние между фронтами от крайних точек щели будет равно

$$d \cdot \sin \varphi,$$

где φ — угол наклона фронтов волн к плоскости решетки. Если на этом расстоянии будет укладываться целое число волн или, что то же самое, четное число полуволн, в фокусе линзы будет свет.

В этом случае

$$d \cdot \sin \varphi = 2m \frac{\lambda}{2},$$

где m — целое число, λ — длина волны света.

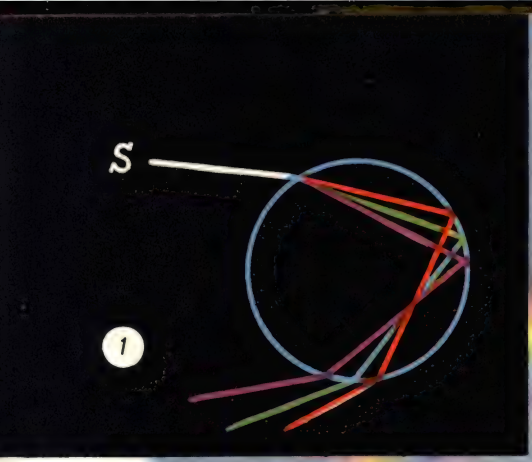
Если угол φ изменить, условие будет нарушено и в фокусе линзы пришедшие колебания заметно ослабят друг друга.

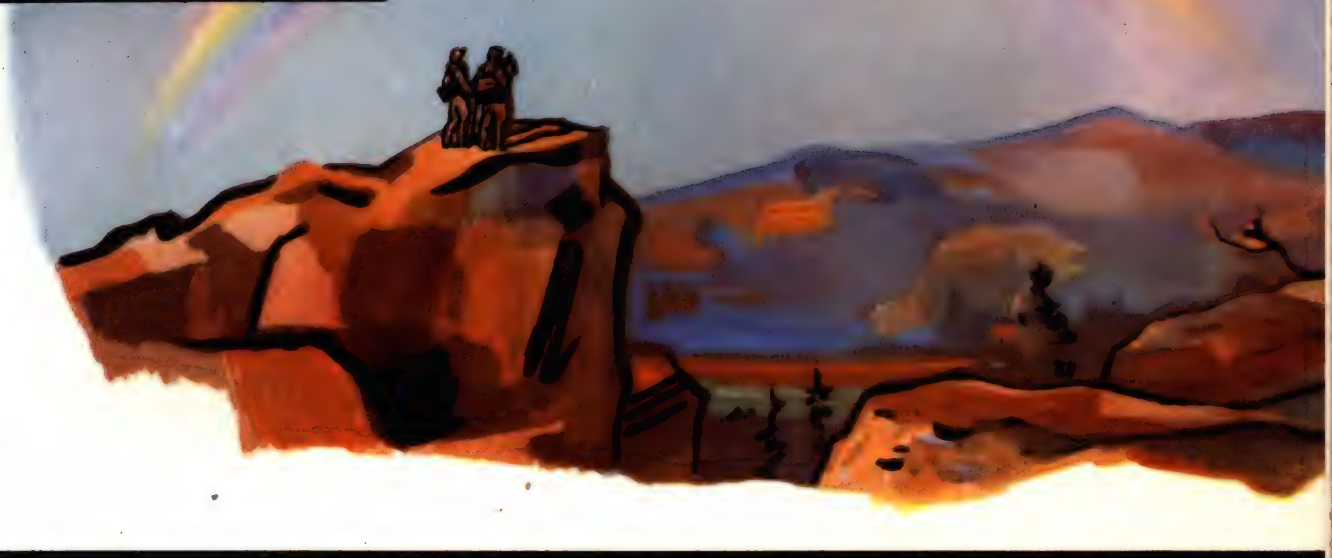
Следующее усиление наступит по такому направлению, определяемому углом φ, при котором колебания будут вновь в одинаковой фазе, что соответствует увеличению числа m на единицу, а это в свою очередь будет соответствовать условию

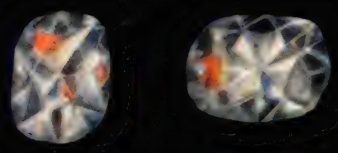
$$d \cdot \sin \varphi = 2(m+1)\frac{\lambda}{2}.$$

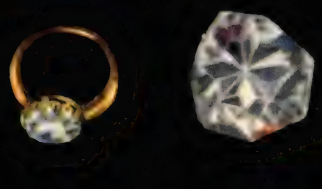
Таким образом, в плоскости экрана будет чередование светлых и темных полос. Светлые полосы будут представлять собой изображение источника света. Обычно им является узкая освещенная щель, расположенная в фокусе собирающей линзы и посылающая параллельный пучок света на решетку.

Таблица 23. Дисперсия света: *1* — в капле воды; в каплях дождя (радуга); в брызгах фонтана (радуга); *2* — в граненых кристаллах.

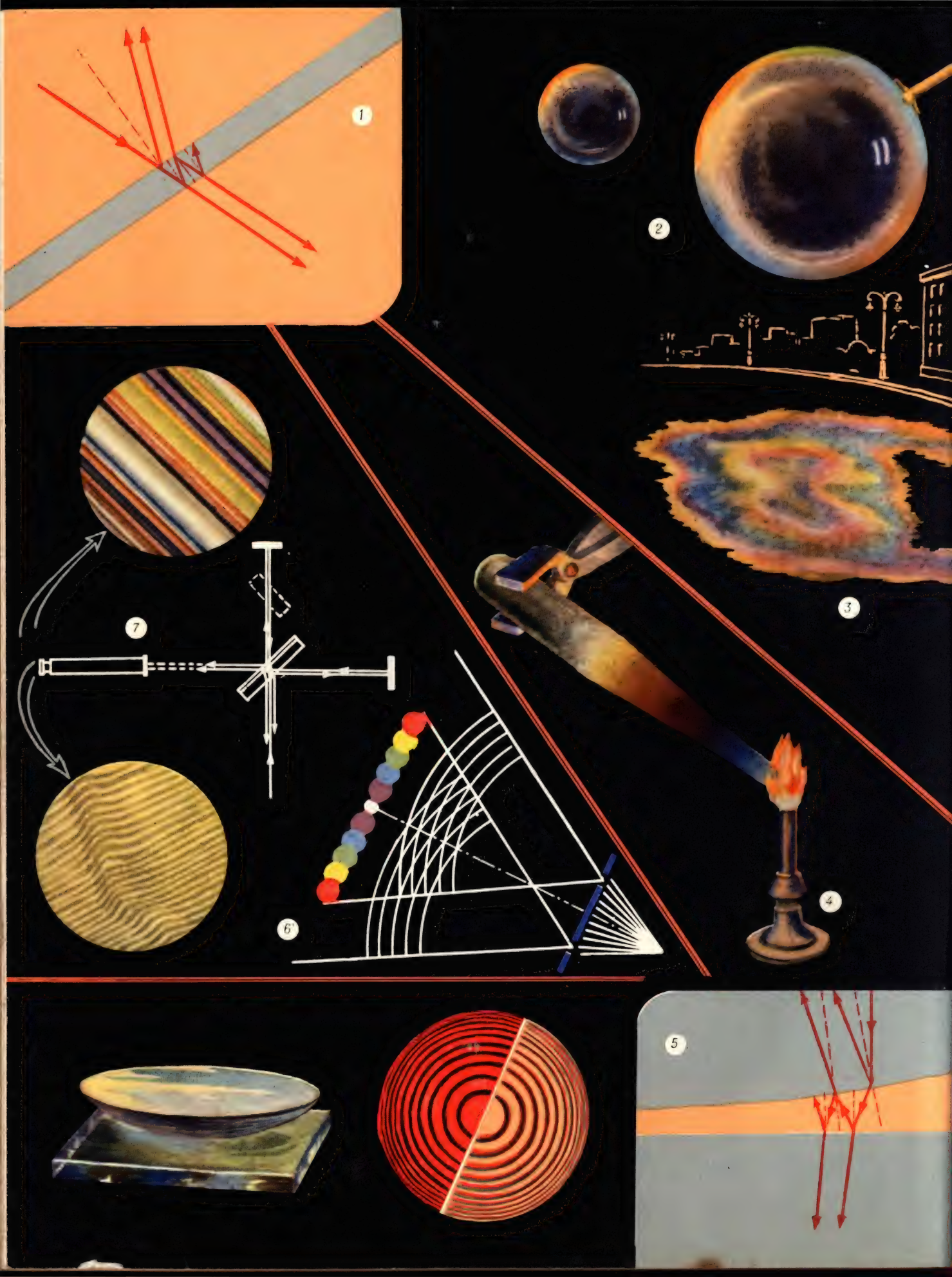








2


1
2
3
4
5
6
7

Явление дифракции остроумно использовано для получения спектров.

Если решетка освещается не монохроматическим светом, а белым, то изображение щели получится с радужной окраской.

В направлении, перпендикулярном к плоскости решетки, все цветные изображения щели накладываются друг на друга; цвета смешиваются, и мы видим белое изображение щели.

Вправо и влево от него после темных промежутков располагаются фиолетовые изображения щели, а затем все остальные, вплоть до красного. Потом вновь следует темный промежуток, после него — снова фиолетовые и следующие за ними цвета.

Дифракционными решетками пользуются для исследования спектра различных источников света, например звезд.

Существуют решетки и другого типа, которые не пропускают, а отражают свет. Такие решетки представляют собой чередующиеся полосы, правильно отражающие и рассеивающие свет.

Если взять патефонную пластинку и слегка наклонить ее плоскость к лучу света от электрической лампочки, то можно наблюдать дифракционные спектры. Звуковые дорожки в этом случае являются полосами отражательной решетки. Аналогичную картину можно наблюдать при помощи металлической линейки с миллиметровыми делениями. Но проще всего наблюдать дифракцию, если, слегка сощурив глаза, посмотреть на источник света.

ДВОЙНОЕ ЛУЧЕПРЕЛОМЛЕНИЕ СВЕТА

Если рассматривать какой-либо предмет через кристалл известкового шпата, то он кажется раздвоенным.

Луч света, прошедший через кристалл, делится на два луча.

Это явление, которое называется двойным лучепреломлением, было открыто в 1669 г. датским ученым Бартолином.

Направляя луч света в кристалл по различным направлениям, Бартолин обнаружил, что луч только в одном случае проходит через кристалл, не раздваиваясь.

Это направление в кристалле называют оптической осью. Оно соответствует направлению, соединяющему вершины кристалла, где сходятся три грани тупыми углами.

Подробное исследование явления двойного лучепреломления в кристалле провел Гюйгенс.

Он обнаружил, что луч света, падающий наклонно на пластинку, вырезанную из кристалла, раздваивается и оба луча идут по разным направлениям.

Один из лучей подчиняется закону преломления, его называют обыкновенным, а другой не подчиняется, и поэтому его называют необыкновенным.

Исследования поведения луча в различных кристаллах позволили установить, что свойством двойного лучепреломления обладают турмалин, кварц и другие минералы. Направление в кристалле, по которому свет не испытывает двойного лучепреломления, называется (как мы уже говорили) его оптической осью.

Но самое удивительное явление обнаруживается тогда, когда на пути одного из лучей, прошедшего через кристалл, помещают второй кристалл.

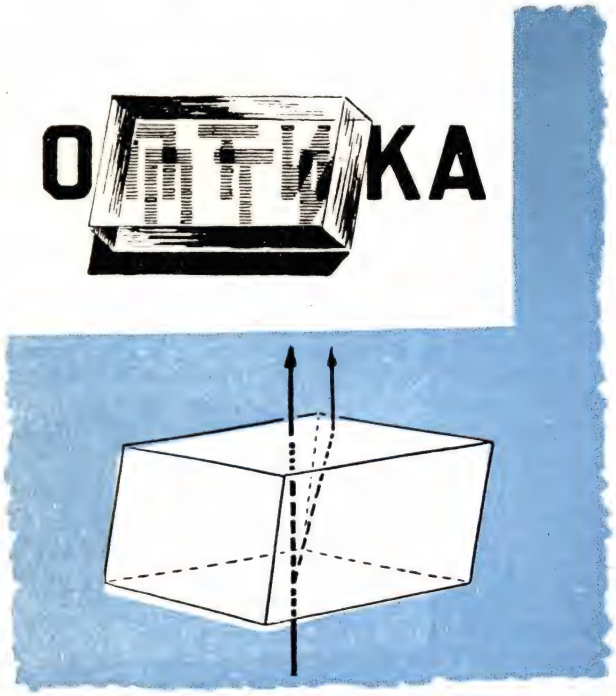
При этом вновь наблюдается раздвоение луча. Вращая второй кристалл, можно заметить, что при определенных положениях один из лучей исчезает, как бы гасится вторым кристаллом, а яркость другого становится заметно больше.

Явление двойного лучепреломления света было известно Ньютону, который полагал, что свет при прохождении через кристалл известкового шпата претерпевает такое воздействие со стороны кристалла, при котором корпускулы своеобразно ориентируются в пространстве. Значительно позже Малюс, который разделял корпускулярную точку зрения на свет, назвал ориентацию корпускул поляризацией света.

Объяснить все особенности поведения лучей света в кристалле, исходя из корпускулярных представлений, не было никакой возможности.

В затруднительном положении оказались и сторонники волновой теории, которые долгое

Таблица 24. Интерференция света: *1* — в плоскопараллельной пластинке; *2* — в мыльной пленке; *3* — в пленке на поверхности воды; *4* — в окисной пленке металла; *5* — в воздушном клине между линзой и плоским стеклом; рядом — интерференционная картина в белом и красном свете; *6* — схема опыта Юнга; *7* — схема интерферометра и интерференционные картины.



Двойное лучепреломление в кристалле.

время полагали, что колебание частиц эфира происходит по направлению распространения волны.

Световые волны, подобно звуковым, считали продольными.

Для того чтобы объяснить явление поляризации света, нужно было допустить, что колебания частиц эфира происходят перпендикулярно к направлению распространения, т. е. что световые волны являются поперечными. После того как было сделано такое предположение, стало возможным установить разницу между поляризованным и неполяризованным, т. е. естественным, светом. В естественном (неполяризованном) свете колебание происходит по любому направлению, перпендикулярному к распространению волны.

В поляризованном свете колебание происходит только в одном направлении, перпендикулярном к распространению волны.

Отсутствие преимущественного направления колебаний в луче естественного света позволяет воспользоваться правилом сложения и разложения движений.

Колебание по любому направлению в каждой точке луча можно разложить по правилу параллелограмма на два заранее выбранных взаимно-перпендикулярных направления.

После такого разложения один луч естественного света представляется двумя лучами, поляризованными во взаимно-перпендикулярных направлениях.

Попадая в кристалл известкового шпата, свойства которого неодинаковы по различным направлениям, естественный луч распадается в кристалле на два поляризованных луча. Колебания одного луча происходят в плоскости, проходящей через оптическую ось (ее называют главной плоскостью кристалла), а колебания другого перпендикулярны к ней.

Именно по этой причине скорости распространения лучей в кристалле, поляризованных таким образом, различны, и они преломляются под разными углами, т. е. происходит двойное лучепреломление.

Поляризованный луч, колебания которого происходят перпендикулярно к главной плоскости, является обыкновенным, а тот луч, колебания которого лежат в главной плоскости,— необыкновенным.

Когда на кристалл падает не естественный, а поляризованный луч, то в том случае, если колебания в этом луче совпадают с главной плоскостью или ей перпендикулярны, из кристалла выходит только один луч. При всех остальных положениях луч расщепляется на два: обыкновенный и необыкновенный,— у которых колебания происходят во взаимно-перпендикулярных плоскостях.

Явление двойного лучепреломления возникает в обыкновенном стекле и других прозрачных материалах, если их подвергнуть деформации, например сжатию или растяжению.

Эта особенность используется весьма остроумно в технике проектирования деталей машин. Из прозрачного материала изготовляют модель детали, которая, находясь в работе, будет деформироваться. Модель под нагрузкой с помощью специальных приборов просвечивают поляризованным светом. При этом на экране получается картина распределения напряжений в модели.

Преобразование естественного света в поляризованный осуществляется с помощью специальных призм. Для того чтобы из кристалла исландского шпата выходил только один поляризованный луч, Никóль остроумно воспользовался явлением полного отражения света. Он разрезал кристалл параллельно оптической оси, а затем склеил его клеем. Показатель преломления необыкновенного луча в слое клея больше, чем показатель преломления в кристалле, а по-

казатель преломления обыкновенного луча — меньше. Необыкновенный луч, достигая плоскости разреза, преломляется в оптически более плотной среде и проходит слой клея как плоскопараллельную пластинку.

Обыкновенный луч падает на плоскость разреза и полностью отражается, так как слой клея является оптически менее плотной средой, а разрез сделан так, что угол падения больше предельного.

После полного отражения обыкновенный луч поглощается в оправе кристалла, а из кристалла выходит один поляризованный — необыкновенный — луч.

Такое устройство для получения поляризованного света называется призмой Николя.

Поляризованным оказывается также свет, отраженный от черного зеркала, если он падает на поверхность зеркала под углом, тангенс которого равен относительному показателю преломления.

При прохождении поляризованного света через воду его плоскость поляризации сохраняет свое направление в пространстве. Но если в воду добавить сахар, то плоскость поляризации света при выходе из слоя сахарного раствора оказывается повернутой относительно направления распространения на некоторый угол. Это явление называют вращением плоскости поляризации. Свойство сахарного раствора вращать плоскость поляризации используется в сахарной промышленности.

Изучение вращения плоскости поляризации показало, что угол поворота пропорционален толщине слоя и концентрации раствора. Если измерить угол поворота плоскости поляризации и толщину слоя сахарного раствора, можно вычислить концентрацию сахара в растворе. Приборы, позволяющие быстро определять концентрацию раствора по углу поворота плоскости поляризации, называются поляриметрами.

НОВАЯ ТЕОРИЯ СВЕТА

Несмотря на все успехи волновой механической теории света во второй половине XIX в., она была подвергнута сомнению. Причиной этих сомнений явились, с одной стороны, опыты Фарадея, открывшего действие магнитного поля на свет, с другой — исследования связи между электрическими и магнитными явлениями, которые проводил Максвелл.

Исследования, произведенные Максвеллом, привели его к выводу, что в природе должны

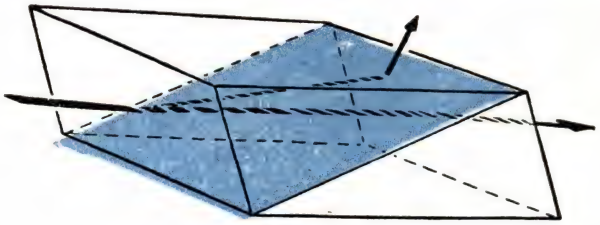


Схема устройства призмы Николя.

существовать электромагнитные волны, скорость распространения которых в безвоздушном пространстве равна скорости света.

Так было положено начало представлениям об электромагнитной природе света.

В 1831 г. Фарадеем был открыт закон электромагнитной индукции, согласно которому изменение потока магнитной индукции создает в проводнике, охватывающем поток, электродвижущую силу индукции. Если же проводник замкнуть, по нему пойдет ток.

Движение электрических зарядов в проводнике происходит под действием сил электрического поля.

Возникновение электрического поля происходит при изменении магнитного поля. Проводник служит нам лишь для обнаружения возникающего электрического поля. Электрическое поле возникает вокруг изменяющегося магнитного поля, охватывая его кольцом.

Предположение Максвелла о том, что изменения электрического поля влекут за собой возникновение потока магнитной индукции, явилось следующим шагом вперед.

Таким образом, возникшее переменное электрическое поле вокруг магнитного в свою очередь создает переменное магнитное поле, охватывающее электрическое, которое вновь возбуждает электрическое, и т. д.

Быстропеременные электрические и магнитные поля, распространяющиеся со скоростью света, образуют электромагнитное поле. Электромагнитное поле распространяется в пространстве от точки к точке, создавая электромагнитные волны. Электромагнитное поле в каждой точке характеризуется напряженностью электрического и магнитного полей. Напряженность электрического и магнитного полей — величины векторные, так как характеризуются не только величиной, но и направлением. Векторы напряженности полей взаимно перпендикулярны и перпендикулярны к направлению распространения.

Поэтому электромагнитная волна является поперечной.

Из теории Максвелла вытекало, что электромагнитные волны возникают в том случае, если изменения напряженности электрического и магнитного полей будут происходить очень быстро.

Справедливость максвелловских представлений опытным путем доказал Герц.

В 1888 г. Герц получил электромагнитные волны, для чего воспользовался разрядом, который происходит в искровом промежутке между двумя стержнями, соединенными с индукционной катушкой. Излучаемые таким вибратором волны он обнаруживал другим, аналогичным вибратором, искровой промежуток которого был соединен с газоразрядной трубкой.

Каждый раз, когда происходил разряд в вибраторе-излучателе, вспыхивала газоразрядная трубка, присоединенная к вибратору-приемнику.

Излучатель и приемник Герца очень похожи на обыкновенную антенну для приема телевизионных передач.

Опыты Герца с электромагнитными волнами побудили П. Н. Лебедева искать пути для доказательства тождественности их поведения с поведением света.

В 1895 г. П. Н. Лебедев при помощи вибраторов создал волны длиной в 6 *мм*.

Изучая их поведение, он наблюдал отражение, преломление, интерференцию, поляризацию и двойное лучепреломление электромагнитных волн.

Эти опыты убедительно доказывали тождественность природы электромагнитных волн и света.

Другим убедительным экспериментальным доказательством электромагнитной природы света являются опыты П. Н. Лебедева по измерению давления света.

Проблема измерения величины давления света возникла еще во времена Ньютона, но успешно решена была лишь П. Н. Лебедевым в 1901 г.

ШКАЛА ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ВОЛН

В природе встречаются электромагнитные волны самых различных длин. Изучение спектра началось с его видимой части, а затем стало распространяться в сторону длинных и коротких волн.

Электромагнитные волны, которые воспринимает глаз, имеют длину волны от 0,7 микрона (темно-красный цвет) до 0,35 микрона (темно-фиолетовый). Этот интервал, конечно, условный, он может быть чуть-чуть расширен или уменьшен с одной или другой стороны.

Все различие между невидимыми электромагнитными волнами и светом заключается лишь в длине волны.

Участок видимого света можно наглядно себе представить, если построить шкалу электромагнитных волн.

За длинами волн, которые еще воспринимает наш глаз, лежит область длин волн, не воспринимаемых глазом.

Термометр, помещенный в спектр белого света, в область длин волн, бо́льших 8000 Å, нагревается. Это указывает на существование невидимого «света».

Опыты с невидимыми лучами были поставлены Гершелем. Исследуя отражение и преломление невидимых лучей, он установил, что они ведут себя так же, как и видимые. Эти лучи были названы и н ф р а к р а с н ы м и.

В начале XIX в. были обнаружены у л ь т р а ф и о л е т о в ы е лучи.

В пробирке с хлористым серебром, помещенной в той части спектра, где обрываются фиолетовые лучи, началась химическая реакция. Это действовали невидимые ультрафиолетовые лучи. Длина волны этих лучей короче видимых фиолетовых.

Исследование ультрафиолетовых лучей затруднялось тем, что они сильно поглощаются стеклом, которое служит основным материалом при изготовлении линз и призм. Тогда ученые научились изготовлять специальные сорта стекол. Линзы и призмы из такого стекла не поглощают ультрафиолетовых лучей, длина волны которых не меньше 3000 Å. Изучение еще более коротких волн, вплоть до 1800 Å, возможно с помощью кварца. Если же воспользоваться минералом флюоритом, то удается исследовать волны длиной до 1200 Å.

Для ультрафиолетовых лучей столь короткой длины волны воздух малопрозрачен. Особенно сильно их поглощает кислород. Исследование очень коротких волн проводят поэтому в сосудах, из которых удален воздух.

Ультрафиолетовые лучи выявляют теперь с помощью фоточувствительной эмульсии, в которой под их действием происходят определенные химические реакции.

Таким методом удалось исследовать ультрафиолетовые лучи, длина волны которых близка к 20 Å.

Особенно благоприятные условия для исследования ультрафиолетовой части солнечного спектра существуют на искусственных спутниках Земли, движение которых происходит в условиях сильно разреженной атмосферы, а также на космических ракетах.

Еще до того, как были получены столь короткие ультрафиолетовые лучи, Рентген при изучении электрического разряда в трубке с сильно разреженным воздухом обнаружил свечение экрана, покрытого сернистым цинком. Свечение наблюдалось в момент, когда в трубке происходил электрический разряд. Изучая причину свечения экрана, Рентген пришел к выводу, что при разряде происходит излучение неизвестных до того времени лучей, которые он назвал *X*-лучами.

X-лучи обладают большой проникающей способностью. Плотный картон и бумага, доска и тонкая жесть не являются для них препятствием. Лучи проникают через предметы из этих материалов, а свечение экрана, расположенного за этими предметами, ослабевает совсем немного.

Иная картина наблюдается в том случае, если на пути лучей поместить преграду из свинца. Свинец поглощает *X*-лучи, для них он непрозрачен. Предметы из свинца отбрасывают на экран сернистого цинка резкую тень. Это свойство роднит *X*-лучи со светом, указывая на их прямолинейное распространение.

Прозрачными для *X*-лучей оказались и ткани тела; кости же отбрасывают на экран тень. Это обстоятельство позволило воспользоваться *X*-лучами в медицине. С их помощью стали выявлять очаги заболевания в легких, внутренние переломы костей и т. п.

Относительно природы *X*-лучей, впоследствии названных лучами Рентгена, мнения исследователей разделились: одни полагали, что они представляют собой поток частиц очень большой энергии, другие считали их электромагнитными волнами, подобными свету, но с очень малой длиной волны.

Решение этого важного вопроса было найдено при исследовании лучей Рентгена, проходящих через кристаллы.

Расположив исследуемый кристалл на пути лучей, ученые обнаружили, что на фотопластинке, помещенной позади кристалла, кроме центрального пятна, появляются симметрично расположенные пятна. Положение пятен изменяется при замене одного кристалла другим.

Объяснил происхождение дополнительных пятен М. Лауэ. Если лучи Рентгена являются волнами, то, проходя через кристалл, где атомы расположены в виде правильной пространственной решетки, они рассеиваются атомами. Рассеянные волны между собой интерферируют, усиливая друг друга по одним направлениям, и создают дополнительные пятна на фотопластинке.

Таким образом, был установлен волновой электромагнитный характер рентгеновских лучей. Опыты Лауэ положили начало рентгеноструктурному анализу кристаллов.

Положение пятен на фотопластинке зависит от расстояния между атомами в решетке кристалла, поэтому каждый кристалл имеет присущую ему фотографию. Фотоснимки рассеяния рентгеновских лучей позволяют определить расстояние между атомами в кристаллах, т. е. получить представление о так называемой кристаллической решетке. Например, расстояние между атомами натрия и хлора в кристалле поваренной соли равно 2,814 Å.

Если известно расстояние между атомами, то по положению дополнительных пятен возможно определить длину волны рентгеновских лучей, которые создаются в разрядных трубках, называемых рентгеновскими трубками; она находится в пределах от 0,1 Å до длин волн самых коротких ультрафиолетовых лучей.

Но оказалось, что есть лучи, длина волны которых менее самых коротких лучей Рентгена. Они были открыты Беккерелем. Возникают эти лучи при естественном радиоактивном распаде. Среди трех видов излучения, сопровождающих радиоактивный рас-

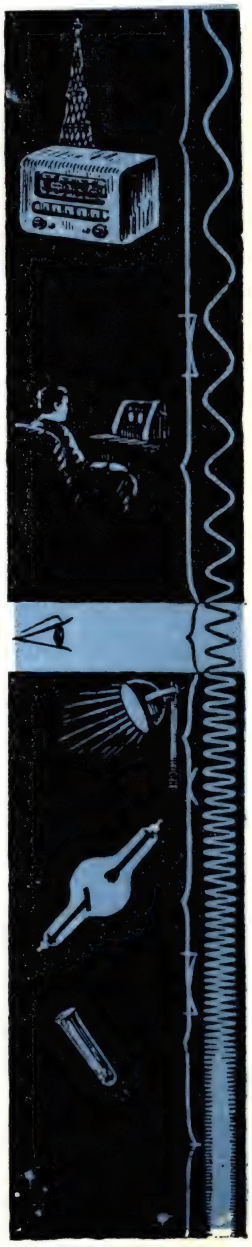


Рис. 7. Шкала электромагнитных колебаний.

пад, гамма-излучение представляет собой электромагнитные волны. Длина этих волн зависит от распадающегося радиоактивного вещества. Например, торий при распаде излучает гамма-лучи с длиной волны в сотни раз меньшей, чем у рентгеновских лучей.

Инфракрасные лучи, создаваемые раскаленными телами, имеют бóльшую длину волны в том случае, если они порождаются телами с более низкими температурами. Затем идут волны, возбуждаемые вибраторами специального устройства, вплоть до самых длинных волн, применяемых в радиовещании. Генераторы постоянного тока возбуждают электромагнитные волны, длина которых бесконечно велика.

Располагая электромагнитные волны в порядке возрастания их длины, мы получим сплошной спектр волн, название которых зависит от способа их возбуждения. Природа же их одна и та же, а различие свойств обусловлено длиной волны (см. рис. 7 и цв. табл. на стр. 472).

ОКРАСКА ТЕЛ В ПРИРОДЕ

Мы видим предметы окрашенными в различные цвета.

Почему листья деревьев зеленые, а цветы могут быть красными, оранжевыми, желтыми, фиолетовыми?

Что такое цвет, ученые поняли до того, как разобрались в подлинной сущности природы света.

Если тело хорошо поглощает падающий на него свет, а отражает плохо, то оно черное, как например сажа. Если же поглощает плохо, а отражает хорошо, то оно белое. Таков снег, который на ярком солнце слепит глаза, отражая падающие на него лучи. Каждое тело имеет способность пропускать, поглощать и отражать свет тех или иных цветов. От того, какие цвета пропускаются, поглощаются и отражаются, зависит окраска тела.

Если свет двух цветов, смешиваясь, дает белый свет, то такие цвета называются дополнительными, так как они дополняют друг друга до белого.

Так, например, синий цвет и желтый являются дополнительными, потому что при смешении они дают белый цвет. Смешение зеленого и красного тоже дает белый цвет, равно как фиолетового и оранжевого.

Раствор хлорофилла в спирте при просвечивании кажется красным, потому что из белого света, который через него проходит, он поглощает зеленые лучи, и, следовательно, непоглощенным остается свет дополнительного цвета — красного.

Свет, отраженный от раствора хлорофилла, зеленый, потому что в отраженном свете отсутствует свет дополнительного цвета.

Говоря о дополнительных цветах световых лучей, не следует забывать, что речь идет о смешивании света различных цветов, а не о смешивании красок.

Смешивание красок — другое дело. Например, синяя и желтая краски при смешивании дают зеленый, а не белый цвет.

Это происходит потому, что после смешивания крупинки синей краски поглощают из белого света, который ее освещает, все лучи, кроме синих и частично зеленых. Крупинки желтой краски в этой смеси поглощают из белого света все цвета света, кроме желтого и немного зеленого. Таким образом, отраженный свет от такой смеси будет зеленого цвета, так как смесь поглощает лучи всех цветов, кроме зеленого.

Очень часто задают вопрос: почему некоторые тела прозрачны? Разве они не поглощают свет, проходящий через них?

Конечно, поглощают, но в малом количестве, и при этом свет всех цветов в одинаковой мере. Таким образом, в свете, прошедшем через прозрачный предмет, не будет нарушено соотношение между различными цветами.

Если прозрачное тело поглощает свет не всех цветов в равной мере, то оно получает соответствующую окраску. На этом основано изготовление светофильтров. Например, красный светофильтр изготовляют из стекла, которое менее остальных поглощает красную составляющую света.

Тела, освещенные одноцветным светом, будут выглядеть иначе, чем освещенные белым светом.

Так, тела, которые при освещении белым светом зеленые, при освещении их красным светом кажутся темными.

Долго люди не могли ответить на вопрос, отчего небо голубое, а зори красные.

Голубой цвет неба объясняется рассеянием солнечного света в воздушной атмосфере Земли.

Рассеяние света в земной атмосфере, как это было показано работами акад. Л. И. Мандельштама, происходит благодаря молекулярному строению воздуха. Не все составляющие белый свет цвета рассеиваются воздухом одинаково. Оказывается, что больше всего рассеивается свет голубого цвета. Поэтому небо кажется голубым.

На восходе и закате Солнце и Луна имеют медно-желтый, а иногда и красный цвет. Это происходит оттого, что, когда Солнце (или Луна) находится на горизонте, лучи света проходят больший путь через толщу атмосферы, чем когда светило в зените. При этом опять-таки происходит рассеяние, причем преимущественно синей и голубой составляющих солнечного света. Поэтому-то доходящий до нас свет кажется медно-желтым и даже красноватым.

Присутствие в воздухе мельчайших частичек пыли и влаги, туман усугубляют рассеяние синей и голубой составляющих, и они к наблюдателю не доходят. В этом случае Солнце становится красным. Окрашиваются в розово-красный цвет и облака — таково происхождение зорь.

ИСТОЧНИКИ СВЕТА

Все тела в природе при любых температурах излучают электромагнитные волны различной длины. Эти волны уносят с собой энергию, количество которой зависит от температуры излучающего тела. Если температура тела не очень высокая, то длинные волны уносят энергии больше, чем короткие. По мере увеличения температуры максимум энергии перемещается в сторону более коротких волн.

Зависимость распределения энергии в спектре излучения тел от температуры широко используется в металлургической промышленности для определения температуры поверхности разогретого металла. Измеряют температуру с помощью специальных приборов — пирометров. Изображение раскаленной поверхности металла в зрительной трубе совмещают с нитью накала, питаемой током от батареи. Цвет раскаленной нити зависит от величины электрического тока, который через нее течет.

Когда цвет поверхности металла совпадает с цветом нити накала, их температуры одинаковы. Температуру нити определяют по величине тока, измеряемой при помощи специально градуированного прибора.

Наш глаз наиболее чувствителен к желто-зеленой части спектра. Измеряя распределение энергии в спектре Солнца, ученые обнаружили, что максимум энергии приходится именно на этот участок спектра. Особенность излучения тел светочувствительности глаза учитывают при создании источников света.

Измерения позволяют определить температуру поверхности Солнца: 6000°.

Поэтому для создания искусственных источников, свет которых был бы близок к дневному, необходимо достичь температуры, равной температуре поверхности Солнца.

Это создает своеобразные технические трудности, так как необходимы материалы, которые бы не плавились при 6000°.

Сейчас для нитей накаливания широко используется тугоплавкий металл вольфрам.

ФОТОЭФФЕКТ

В 1887 г. Герц обнаружил, что если промежуток разрядника осветить ультрафиолетовым светом, то проскакивание искры заметно облегчается.

Наблюдения Герца дали повод к изучению этого явления. Гальвакс соединил пластинку исследуемого вещества с чувствительным электроскопом. Когда пластинке сообщали отрицательный электрический заряд, листочки электроскопа расходились. При освещении пластинки светом листочки электроскопа опадали. Следовательно, под действием света пластинка теряла свой заряд. Это явление получило название *фотоэлектрического эффекта*.

Изменив методы наблюдения, А. Г. Столетов произвел количественные измерения величины фототока.

Исследуемая пластинка являлась пластиной конденсатора. Конденсатор соединялся с электрической батареей и гальванометром. При облучении пластинки светом электрической дуги гальванометр обнаруживал в цепи ток. Он появлялся только в том случае, если пластинка была соединена с отрицательным полюсом электрической батареи.

Фотоэлектрический эффект обнаруживают почти все вещества, даже такие, как лед и вода, если их облучать ультрафиолетовыми лучами.

Наибольшее значение длины волны падающего света, при которой еще наблюдается фотоэффект, называется *порогом* фотоэффекта. Было установлено, что для каждого металла существует свой порог. Скорость, с которой вылетают электроны, начиная с порога фотоэффекта по мере уменьшения длины волны падающего света возрастает.

Теория фотоэффекта была дана в 1905 г. Эйнштейном. В основу теории были положены квантовые представления о природе света.

Излучение и поглощение света атомами вещества происходит определенными порциями, которые М. Планк назвал *квантами*.

Квант энергии света, падающего на поверхность металла, поглощается. При этом поглощенная энергия частично расходуется при выходе

электрона с поверхности металла, а остальная часть уносится электроном в виде кинетической энергии:

$$h\nu = A + \frac{mv^2}{2},$$

где $h\nu$ — квант энергии поглощенного света, A — энергия, затраченная на работу выхода, $\frac{mv^2}{2}$ — кинетическая энергия вылетевшего электрона.

Если квант энергии меньше работы выхода A, то фотоэффект не наблюдается.

Когда электроны под действием света покидают поверхность металла, фотоэлектрический эффект называют внешним. Фотоэлектроны при этом замыкают цепь электрической батареи, и в ней течет ток.

Техническое использование внешнего фотоэффекта требует специальной батареи.

В настоящее время широкое применение получил внутренний фотоэффект.

Его открыли при изучении сопротивления проводников, изготовленных из селена. Электрическое сопротивление селена оказалось весьма своенравным. Оно изменялось всякий раз, как только менялось освещение поверхности проводника. Это непонятное явление первое время не привлекло внимания исследователей и вскоре было забыто. Но затем на него натолкнулись вновь. Физики поняли, что они имеют дело с явлением внутреннего фотоэффекта, т. е. явлением, когда под действием света в проводнике увеличивается число свободных электрических зарядов. Ток в проводнике при этом возрастает, а сопротивление соответственно уменьшается.

Вещества, обладающие этим свойством, используются теперь для создания фотоэлементов с внутренним фотоэффектом. Фотоэлементы под действием света становятся источниками электрической энергии. Поэтому совершенно очевидно преимущество внутреннего фотоэффекта перед внешним.

ХИМИЯ СВЕТА

Применение света в химии стало особенно широко распространяться после того, как были выяснены его квантовые свойства.

Двухатомная молекула, поглощая свет, распадается на атомы. Йодистый водород, например, под действием света распадается на йод и водород.

Реакция идет под действием фиолетовых лучей. В обычных условиях происходит немедленное воссоединение атомов.

Под действием света растения ассимилируют углекислоту из воздуха. Это одна из важнейших жизненных реакций.

В темноте растения дышат, поглощая кислород и выделяя углекислоту. При свете растения поглощают углекислоту, выделяя кислород. Реакция идет под действием видимых лучей, поглощаемых хлорофиллом. Углекислота, соединяясь с водой, дает кислород и муравьиный альдегид:

$$CO_2 + H_2O = CH_2O + O_2.$$

Муравьиный альдегид полимеризуется. Такими полимерами могут быть крахмалы.

Зеленым цветом растения обязаны хлорофиллу, который приспособлен к поглощению энергии солнечного спектра в воздухе.

В глубинах моря, куда больше всего проникают зеленые лучи, растения красного цвета. Красная окраска указывает на то, что они поглощают зеленые лучи Солнца, энергия которых расходуется на фотохимические превращения.

ФЛУОРЕСЦЕНЦИЯ И ФОСФОРЕСЦЕНЦИЯ

Свет, проходя через вещество, всегда вызывает его свечение. В одних случаях это свечение такое слабое, что его трудно обнаружить, в других случаях оно отчетливо проявляется и отлично от света, которым порождено.

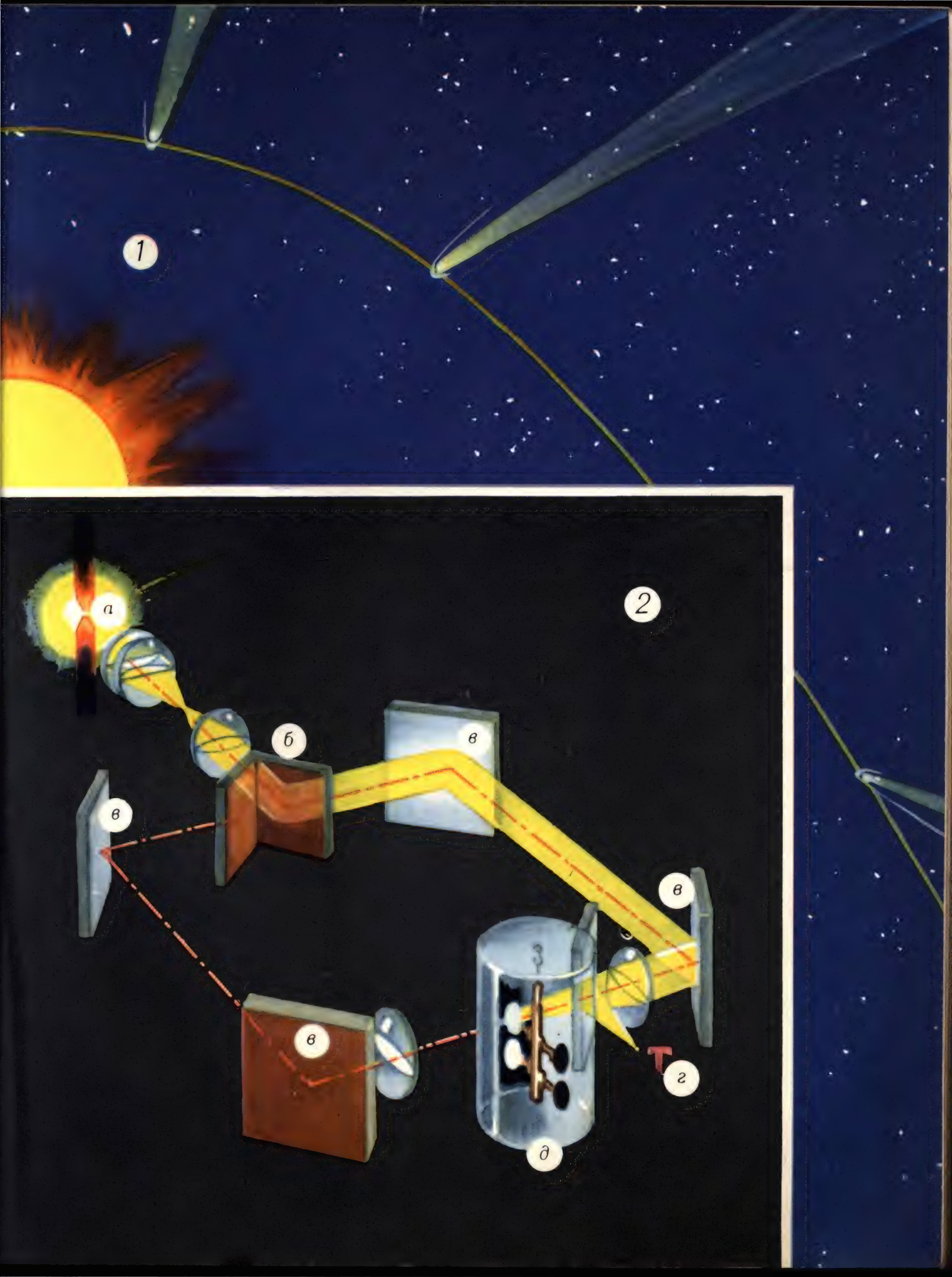
Среди свечений такого рода мы остановимся на двух.

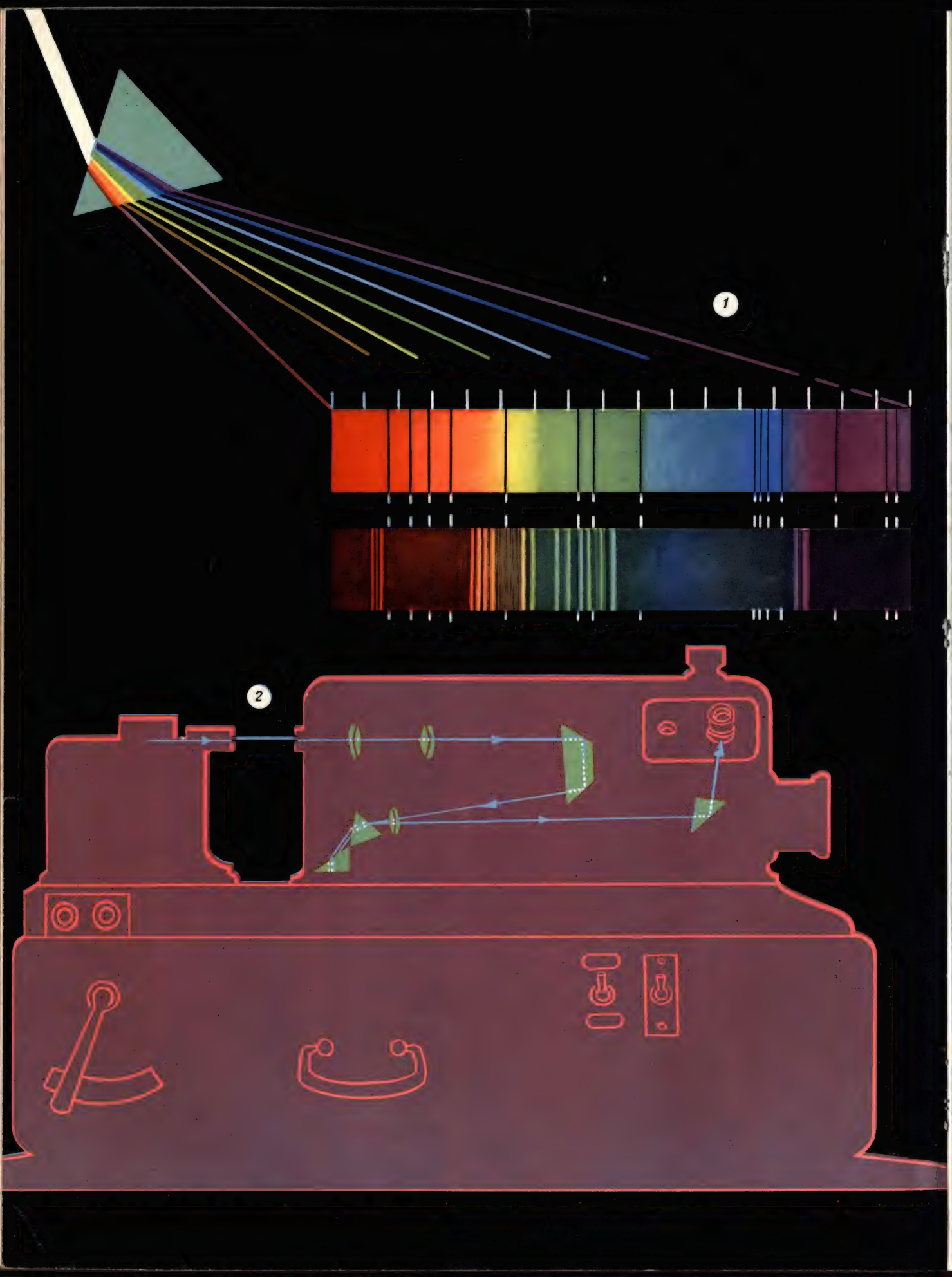
Первое из них — флуоресценция.

Слово это происходит от названия минерала флюорита (плавиковый шпат), который начинает светиться под действием падающего на него света. Явление флуоресценции прекращается, как только прекращается освещение флуоресцирующего тела.

Флуоресценцией обладают многие вещества: керосин, стекло, бумага, некоторые красители.

Таблица 25. Давление света. *1.* Давление света на хвост кометы. *2.* Опыт П. Н. Лебедева по измерению величины светового давления: *а* — источник света — электрическая дуга; *б* — подвижное зеркало, изменяющее направление пучка света; *в* — неподвижные зеркала для поворота светового пучка; *г* — термоэлемент, на который падает свет, отраженный полупрозрачной пластиной; *д* — сосуд, в котором находится подвеска с крылышками, отражающими или поглощающими свет.


1
2
а
б
в
в
в
в
г
д


1
2

Второй вид свечения тел — фосфоресценция. Ее особенность заключается в том, что тела еще довольно долго продолжают светиться и после того, как освещение прекратилось.

Свое название фосфоресценция получила от фосфора, который при окислении дает интенсивное свечение. В лесу светятся гнилые пни. Фосфоресцируют также некоторые жучки: их называют светлячками.

Явление фосфоресценции применяется в технике. В лабораториях и на производстве встречаются приборы, стрелки и шкалы которых светятся в темноте.

Изучение закономерностей световых явлений во всем их многообразии позволяет широко применять свет в повседневной практике.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Рассмотренные оптические явления далеко не исчерпывают всего многообразия проявлений света в природе и технике.

Свет, по представлениям нашего времени,— сложное электромагнитное явление, в котором проявляются волновые и корпускулярные свойства электромагнитного поля.

ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ РАДИО

Каждое утро во всех городах и населенных пунктах нашей страны раздается голос репродуктора. Он сопровождает нас в течение всего дня: по радио мы узнаем последние новости и проверяем свои часы, слушаем отрывки из литературных произведений, а в часы досуга он наполняет комнату звуками чудесной музыки.

Мы так привыкли к этому голосу, что порой даже перестаем его замечать. Трудно представить себе, что еще каких-нибудь 50—60 лет назад радиовещания не существовало и большинству людей казалось невероятным, что можно у себя дома слушать концерт с другого конца света.

Что же предопределило столь бурное развитие этой отрасли техники?

Всем известно, что радио изобретено в нашей стране. 7 мая 1895 г. русский физик Александр Степанович Попов впервые в мире продемонстрировал передачу электрических сигналов на расстояние без проводов. Это событие и считается днем рождения радио.

В отличие от многих других великих открытий, получивших признание лишь спустя значительное время, открытие А. С. Попова было сразу подхвачено во многих странах мира. Но буржуазно-помещичья Россия и в этом случае оказалась неспособной использовать изобретение своего ученого. Собственное производство радиоаппаратуры налажено не было, и ее стали ввозить из-за границы, большей частью из Англии, где широко развернул свою деятельность инженер и коммерсант Маркони.

Что же представляет собой радио? На каких физических принципах оно основано? Чтобы ответить на эти вопросы, нужно мысленно вернуться назад, к тому времени, когда электротехника делала свои первые шаги.

РАДИОЛАМПА И ЭЛЕКТРОНЫ

В 1883 г. знаменитый американский изобретатель Томас Эдисон экспериментировал с пустотной лампой накаливания — прообразом обычной электрической лампочки. В то время лампы еще не наполнялись инертным газом, а откачивались до возможно большей степени разрежения, чтобы максимально замедлить окисление и перегорание нити накала. При одном из опытов в стеклянный баллон лампы была впаяна, кроме нити накала, металлическая пластинка. Совершенно случайно подсоединив между ними батарею, Эдисон заметил, что, если пластинка присоединена к положительному полюсу батареи, через пространство между нитью и пластинкой течет электрический ток!

Таблица 26. 1. Дисперсионные спектры. *2.* Внешний вид и ход лучей в стилоскопе (лучи на рисунке показаны голубыми стрелками).

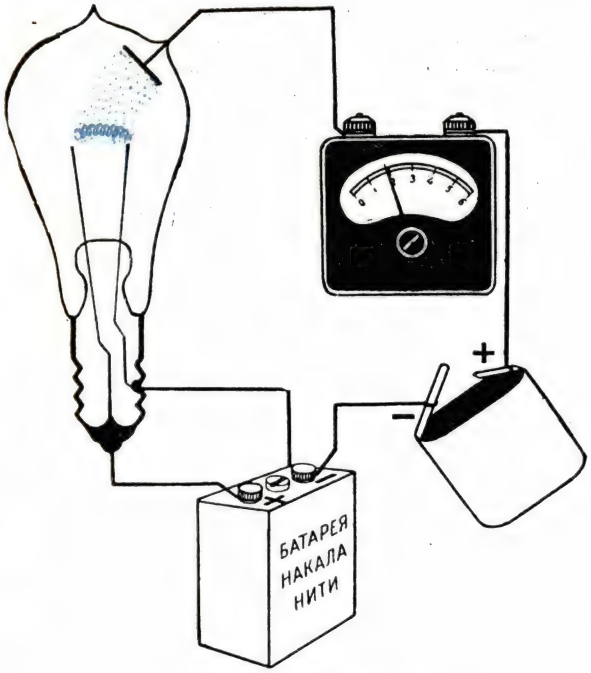


Схема опыта Эдисона.

Это было тем более неожиданно, что лампочка была, как мы уже говорили, пустотной, т. е. практически весь воздух из нее был откачан. Значит, ток протекал через безвоздушное пространство. Неожиданное открытие сильно взволновало и заинтересовало Эдисона, но объяснить его физическую сущность он так и не смог. Не смог Эдисон и применить это открытие на практике, хотя на всякий случай и запатентовал свое изобретение.

Как же объясняет это явление современная наука? Почему ток течет через безвоздушное пространство?

Каждый школьник знает, что вещество состоит из атомов. В центре каждого атома расположено ядро. Его окружает одна или несколько электронных оболочек.

Ядро атома заряжено положительно, а каждый электрон несет отрицательный заряд. В целом атом нейтрален, так как отрицательный заряд всех электронов равен положительному заряду ядра. Но электроны не связаны с атомом неразрывно — при известных обстоятельствах они могут его покидать. Тогда в потерявшем электрон атоме появится избыток положительного заряда.

Но атом может иногда захватить лишний электрон; в этом случае суммарный заряд его станет отрицательным. Атом, получивший заряд, называется ионом. Ионизация атомов происходит по различным причинам: под влиянием температуры, под воздействием космических и ультрафиолетовых лучей, заряженных частиц и т. д.

Особенно легко теряют электроны атомы металлов. Ионы составляют остов кристаллической решетки; между ними беспорядочно движутся свободные электроны.

Что же удерживает электроны внутри проводника, не могут ли они «с разбега» выскочить из металла? В обычных условиях — нет. На поверхности металла группируются отрицательные заряды, так как каждое ядро окружено электронными оболочками, и, таким образом, вся внешняя поверхность проводника «покрыта» электронами. А так как отрицательные заряды взаимно отталкиваются, свободный электрон будет отбрасываться назад; кроме того, положительные ядра кристаллической решетки металла также тянут его в глубь проводника.

Но как ни плотен электронный барьер, его все же можно преодолеть. Нужно только увеличить энергию свободных электронов. Сделать это можно, например, нагревая проводник. Оказывается, при нагревании скорость движения электронов увеличивается, растет запас их кинетической энергии, и при определенной температуре ее уже оказывается достаточно, чтобы преодолеть силы отталкивания электронного барьера.

Конечно, не все электроны имеют одинаковую скорость; поэтому при подогревании из металла сначала вылетают наиболее быстрые электроны; при дальнейшем повышении температуры число быстрых электронов увеличивается. Поэтому чем выше температура, тем большее количество электронов может покинуть проводник.

Испускание электронов, происходящее при нагревании проводников, носит название термоэлектронной эмиссии. В металлах заметная эмиссия электронов начинается при температуре 2000—2500° С.

Но далеко не каждый металл выдерживает такую температуру не плавясь! Одним из самых тугоплавких металлов является, например, вольфрам: при температуре белого каления 2200° С он еще достаточно прочен, Вот почему Эдисону удалось обнаружить электронный ток в обычной осветительной лампочке с вольфрамовой нитью.

Между прочим, первые радиолампы потому и назывались «лампы», что они светили не хуже осветительных. Это и понятно: ведь нужно было обеспечить хорошую эмиссию. Но многие

знают, что современные лампы со стеклянными баллонами совсем не светят. Что же, у них хуже эмиссия? Конечно, нет, очевидно даже лучше.

Свечение электронной лампы не мешает эмиссии, но на накаливание нити до белого каления идет слишком много электроэнергии, такие лампы неэкономичны. Поэтому очень важно было найти способы повышения эмиссионной способности нагретой нити.

Самое первое условие повышения эмиссии было выполнено как бы само собой. Если бы Эдисон не откачал воздух из лампы, то он едва ли заметил бы, что от пластинки к нити течет ток. Дело в том, что, вырываясь из раскаленного металла, электроны сразу начали бы сталкиваться с атомами и молекулами воздуха и быстро потеряли бы свою энергию. В воздухе электроны не смогли бы пролететь несколько сантиметров и не дошли бы до пластинки. Поэтому нить, предназначенную для испускания электронов, помещают в стеклянный или металлический баллон, из которого откачивают воздух — создают вакуум. Весь газ откачать нельзя, но в современных радиолампах давление в несколько миллиардов раз меньше нормального атмосферного. При таком разрежении электроны распространяются практически беспрепятственно: из миллиона электронов только один может встретиться с молекулой газа.

Простейшая радиолампа состоит из раскаленной нити, испускающей электроны, и пластинки, которой эти электроны могут достигнуть. Нить — это катод, пластинка — анод. Кроме того, их называют электродами.

Известно много способов активирования катодов, т. е. повышения их активности в отношении излучения электронов. Добавляли к вольфраму металлы торий, барий, а в настоящее время покрывают оксидами — соединениями окислов некоторых металлов (бария, стронция). Все эти меры облегчают выход электронов из металла, и тем самым уменьшается расход электроэнергии, так как отпадает необходимость сильно разогревать катоды.

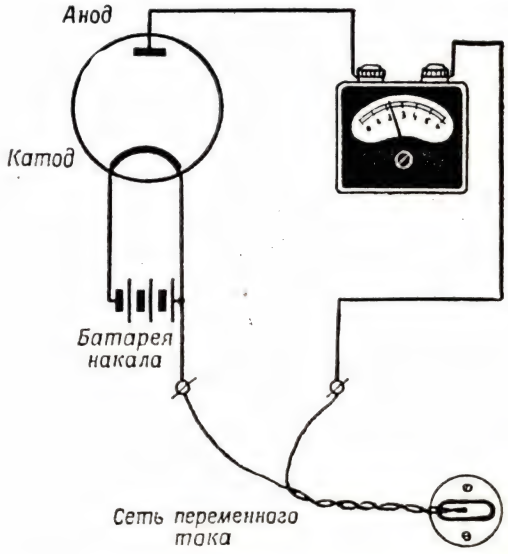
В современных лампах с активированными катодами уже не нить испускает электроны. Для того чтобы можно было разогревать катод переменным током, что значительно проще и удобнее, русский ученый проф. А. А. Чернышев предложил делать так называемые подогревные катоды. Внутри активированной трубки-катода помещают нить подогрева, которую и раскаляют докрасна переменным током. Все радиолампы в настоящее время делаются только с такими активированными подогревными катодами, кроме, правда, некоторых типов особо мощных ламп.

ЧТО ДАЛ ДИОД РАДИО

Чем же может помочь радиоприемнику простейшая двухэлектродная лампа, называемая обычно диодом?

Сейчас уже многие забыли, как были устроены первые радиоприемники. Современному читателю даже трудно себе представить, что можно построить радиоприемник без единой лампы. Те же, кто помнит, как выглядели первые приемники, знают, что непременной их деталью был детектор — небольшой кристалл, обладающий способностью выпрямлять подводимые к нему электромагнитные колебания. Но прибор этот на редкость капризный. Для того чтобы он начал работать, нужно тонкой, заостренной на конце проволочкой найти на кристалле точку, в которой он обладает наибольшей чувствительностью, причем эту точку нужно искать заново каждый раз, когда необходимо включить приемник.

Однако, каковы бы ни были недостатки детекторов, они явились шагом вперед по сравнению с первыми приемниками А. С. Попова, где роль выпрямителя играл когерер — небольшая трубка, наполненная железными опилками. Еще бо́льшим шагом вперед было введение в



Диод включен в сеть переменного тока.

схему приемника диода — скромной двухэлектродной лампы, о которой мы говорили выше. Как же работает этот замечательный прибор?

Если включить диод в цепь переменного тока, он пропустит ток только в одном направлении, т. е. только тогда, когда к катоду будет приложено отрицательное напряжение, а к аноду — положительное. Иначе и не может быть, так как, если к аноду приложить отрицательный полюс батареи, электроны, вылетевшие из катода, не только не будут притягиваться анодом, но, наоборот, будут отталкиваться от отрицательно заряженного анода и возвращаться обратно на катод.

Поэтому, если подать на диод переменное напряжение, он будет пропускать ток только тогда, когда напряжение проходит положительные значения. В то время, когда будет проходить отрицательная полуволна, диод будет «заперт», и ток по нему не пойдет.

Как правило, изменение напряжения в цепях переменного тока носит строго периодический характер: отрицательные и положительные полупериоды следуют друг за другом через равные промежутки времени.

Характер изменения переменного напряжения обычно выражается синусоидой — кривой, которая по внешнему виду очень напоминает волну.

Нагляднее всего можно представить процессы, происходящие в диоде, с помощью графика. На рис. 1 изображена синусоида напряжения, которое подается между анодом и катодом диода. Ток течет через прибор, включенный в цепь диода, только тогда, когда к аноду лампы приложены положительные значения напряжения; поэтому, как видно из второго графика, он носит пульсирующий характер, но зато течет только в одном направлении, когда электронам открыта дорога на анод. Эти выпрямляющие свойства диода и позволили использовать его как высокочувствительный детектор.

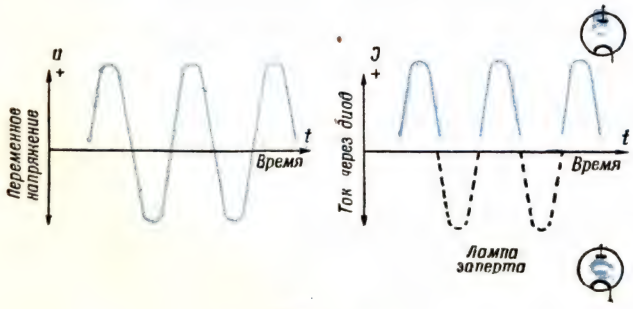


Рис. 1.

Радиоволны представляют собой электромагнитные колебания высокой частоты. Несколько сотен тысяч и даже миллионов раз в секунду изменяется напряжение сигнала, пришедшего через антенну в приемник. Если это переменное высокочастотное напряжение приложить к диоду, он выпрямит его и через диод потечет пульсирующий, но постоянный по направлению ток, которым можно привести в действие реле, звонок и т. д.

Даже небольшое положительное напряжение «открывает» диод, так как при достаточной эмиссии даже без приложенного напряжения через диод течет, правда очень небольшой, начальный ток. Поэтому стоит только приложить небольшое положительное напряжение к аноду, как поток электронов резко увеличится.

Благодаря этому свойству диода резко возросли возможности радио. Главное — увеличилась дальность приема и значительно упростилась и стала совершеннее схема приемника.

Диоды сразу завоевали всеобщее признание и быстро вытеснили кристаллические детекторы, которые долгое время применялись вместо когереров.

Но настоящую революцию в радиотехнике совершила другая лампа, появившаяся вслед за диодом. В 1906 г. американец Ли де Форест ввел в радиолампу третий электрод. Между катодом и анодом он расположил пластинку с отверстиями.

Поскольку отверстий нужно было делать очень много, третий электрод напоминал сетку. Это название сохранилось за ним до сих пор, хотя сетки давно потеряли свой первоначальный вид и теперь, как правило, похожи на спирали. Три электрода определили название лампы — она стала именоваться триодом.

ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ КОЛЕБАНИЯ МОЖНО УСИЛИТЬ

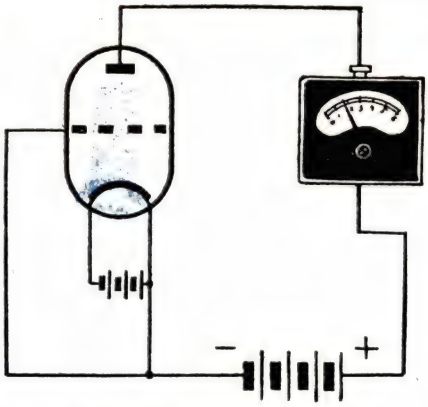
Почему же сетка совершила техническую революцию?

Во-первых, она позволила усиливать радиосигналы. Это имело, конечно, огромное значение, так как теперь слабые сигналы, слабые даже для диода, можно было усиливать во много сотен раз.

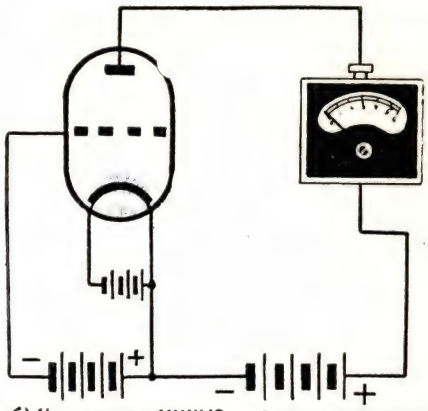
Во-вторых, была открыта возможность использовать триод для генерации, т. е. создания радиоволны.

На чем же основаны эти чудесные качества сетки?

Как мы уже говорили, сетка располагается между катодом и анодом. Если на нее не подавать никакого напряжения, то электроны будут свободно пролетать через сетку к аноду, практически не задерживаясь, так как диаметр проволочек сетки очень мал, а расположены они достаточно редко. И в самой густой сетке будут громадные окна для электронов, так как размеры электронов ничтожно малы.



а) На сетке напряжения нет



б) На сетке «минус» – лампа заперта

Чтобы лучше себе это представить, можно привести такое сравнение. Если мысленно увеличить электрон до размера арбуза, то расстояния между проволочками сетки будут соответствовать расстояниям между планетами солнечной системы.

Можно, разумеется, настолько повысить отрицательный заряд сетки, что она полностью «запрет» лампу и ток прекратится совсем. Такое напряжение носит название «напряжения запирания». Запереть лампу очень легко, для этого требуется напряжение всего в несколько вольт.

Ну а если подать на сетку положительное напряжение и постепенно увеличивать его? Сетка теперь начнет притягивать электроны, разгонять их, причем большинство из них так быстро разгоняется, что они проскакивают сетку «с ходу», а за ней еще сильнее начинают притягиваться положительным напряжением анода.

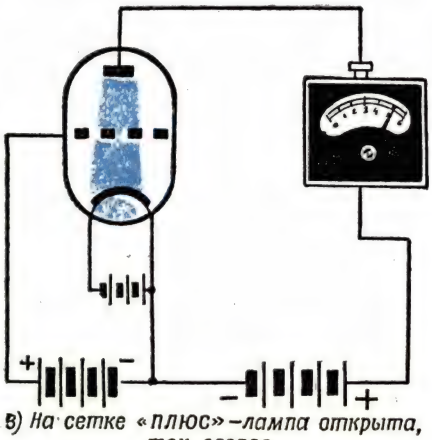
Положительный заряд сетки помогает добраться до анода также тем электронам, скорости которых малы и которые без ускоряющего действия сетки вообще не долетели бы до анода.

Те электроны, которые «воткнутся» прямо в сетку или пролетят очень близко от ее проволочек, притянутся к сетке и создадут побочный сеточный ток, но обычно он ничтожно мал по сравнению с основным, анодным током.

А что произойдет, если увеличивать положительное напряжение на сетке? Будет ли конец возрастанию анодного тока? Может быть, он увеличится беспредельно?

Нет, так случиться не может. Дело в том, что обычно на сетку подают небольшое отрицательное напряжение. В этом случае, как мы уже знаем, только электроны с очень высокими скоростями прорвутся к аноду. Остальные будут вылетать из катода, подлетать к сетке, отталкиваться ее отрицательным зарядом и снова падать на катод. А электронов миллиарды миллиардов, они вылетают со всей поверхности катода и почти все возвращаются обратно.

Поэтому между катодом и сеткой все время находится множество электронов — висит своеобразное «электронное облако». Сколько электронов влетает в него из катода, столько же возвращается обратно на катод. Это электронное облако и есть резерв свободных электронов, которыми так эффективно может управлять сетка. Если мы уменьшим отрицательный заряд сетки, больше электронов прорвется на анод, меньше станет электронное облако и уже при небольших положительных напряжениях на сетке оно практически исчезнет совсем. Вот тогда ток станет максимальным и больше расти не сможет.



в) На сетке «плюс» – лампа открыта, ток возрос

Из сказанного выше видно, что сетка выполняет роль идеальной электрической заслонки. Она управляет анодным током триода, причем управляет «от края и до края». Сетка может полностью запереть лампу, уменьшив анодный ток до нуля, или полностью открыть ее, так сказать мобилизовав все свободные электроны для создания электротока.

Мы уже говорили, что, если не подавать на сетку положительных напряжений, ток самой сетки практически отсутствует. Значит, электроны «зря не расходуются» и идут только с катода на анод, т. е. на образование только анодного тока. А это в свою очередь означает, что сетка, так радикально управляя всем анодным током лампы, сама практически не потребляет никакой энергии.

Кроме этого, лампа с сеткой обладает еще одним ценнейшим свойством — безынерционностью. Это значит, что изменение напряжения на сетке мгновенно изменяет величину анодного тока, так как скорость электронов в вакууме громадна.

Попробуем теперь подать на сетку переменное напряжение, т. е. будем увеличивать и уменьшать с какой-то частотой (сколько-то раз в секунду) потенциал сетки. Очевидно, тем самым мы будем ослаблять или увеличивать анодный ток в такт с изменениями напряжения на сетке. Если на сетку подать напряжение, меняющееся по синусоидальному закону, на аноде появится копия напряжения, поданного на сетку.

Но не точная копия, а значительно увеличенная. Дело в том, что небольшого напряжения в несколько вольт достаточно, чтобы «командовать» всем анодным током радиолампы. Поэтому, подав на сетку небольшое переменное напряжение, на аноде мы получим в несколько раз бóльшую копию этого напряжения. А это и есть усиление.

За счет чего же происходит усиление? Сетка, как мы знаем, практически не потребляет энергии, но зато она управляет энергией анодной батареи: с помощью небольшого переменного напряжения сетка управляет всем потоком электронов, «раскачивает» мощный анодный ток, превращая энергию анодной батареи в энергию колебательного, переменного напряжения, точно повторяющего форму напряжения на сетке.

То, что триод оказался способным усиливать переменное напряжение, сделало его неизмеримо ценнее и важнее диода. Теперь самый слабый сигнал перед подачей на детектор мог быть усилен одним, а если нужно—двумя, тремя и больше триодами. Это резко увеличило дальность радиосвязи. Самые слабые сигналы, которые не произвели бы никакого впечатления на когерер и не были бы замечены даже диодом, превращаются усилительными триодами в сильные, уверенные сигналы. Это и понятно, так как включенные одна за другой лампы могут усилить сигналы в сотни тысяч и даже миллионы раз.

НОВЫЕ ЛАМПЫ — НОВЫЕ ВОЗМОЖНОСТИ

Но этим не ограничилось победное шествие триода.

Как мы уже говорили, было открыто еще одно ценнейшее свойство трехэлектродной лампы: оказалось, что с ее помощью можно генерировать радиоволны. Подробнее мы поговорим об этом несколько ниже.

Ламповые генераторы быстро вытеснили все другие, ранее использовавшиеся приборы, так как были проще, надежнее их и легко позволяли осуществлять передачу по радио речи и музыки. Ламповые передатчики позволяют легко перестраиваться на любую длину волны и не мешают друг другу.

С изобретением генераторов на лампах радио вышло на большую, столбовую дорогу своего развития. Теперь на вооружении радиотехники стояли диоды и триоды. Непрерывно улучшались их усилительные качества и создавались специальные генераторные лампы.

В 1919 г. в Нижегородской радиолаборатории один из основоположников радиотехники М. А. Бонч-Бруевич создал первую в мире мощную электронную генераторную лампу с водяным охлаждением.

В том же году были проведены первые пробные передачи речи и музыки, а через год состоялась рекордная по дальности передача — из Москвы был передан концерт для Берлина. Немцы прекрасно слышали передачу, но ответить таким же концертом не могли: в Германии в то время радиотехника была очень слабо развита.

Мощности советских передающих центров непрерывно наращивались и увенчались созданием в 1933 г. крупнейшей в мире радиостанции им. Коминтерна, мощностью 500 *квт*.

С раскрытием всех возможностей триода в истории радио начался новый период, богатый замечательными достижениями. Изобретатели, инженеры, ученые непрерывно совершенствовали электронную лампу, улучшали ее качества и расширяли область применения. Появились лампы с двумя, тремя, четырьмя, пятью и даже шестью сетками. Эти лампы стали выполнять сложнейшие задачи по управлению и преобразованию электрических колебаний.

Что же дала, например, вторая сетка?

Освоение коротких волн требовало усиления напряжений высокой частоты. Усилители на триодах, использовавшиеся для этой цели, работали неустойчиво и не обеспечивали надежного усиления. Исследования показали, что причина заключается в наличии значительной емкости между анодом и катодом. Дело в том, что любые две пластины, разделенные промежутком, образуют конденсатор. Между двумя проводниками или пластиной и проводником также существует емкость. А емкость (конденсатор), не пропуская постоянный ток, свободно пропускает переменный ток, особенно высокой частоты.

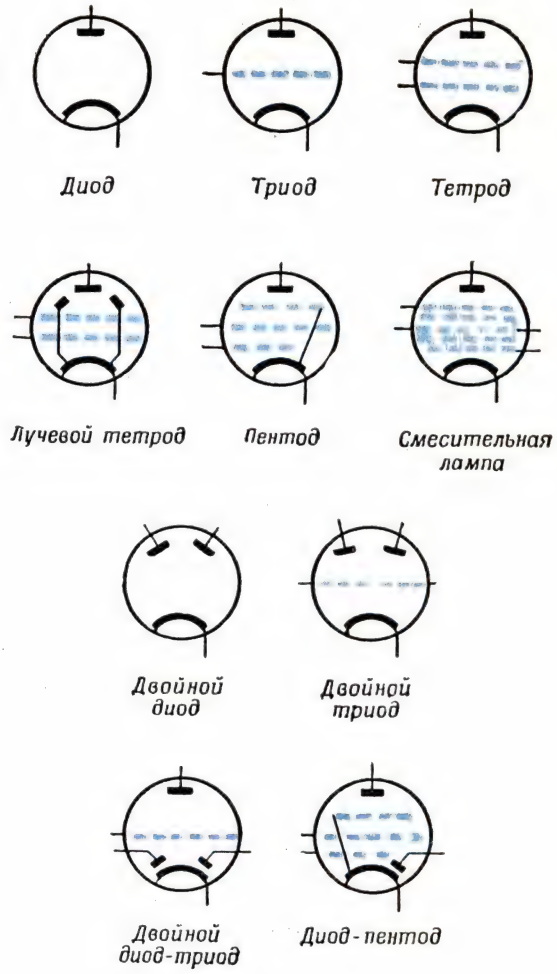
Поэтому при усилении высоких частот емкость между сеткой и анодом начинала оказывать вредное воздействие. Часть усиленного напряжения с анода через эту емкость поступает обратно на сетку, что увеличивает величину сигнала на ней. Это в свою очередь приводит к увеличению анодного напряжения, а значит, увеличивается и доля напряжения, идущего обратно на сетку, и т. д.

В результате работа лампы становится неустойчивой, возникает самовозбуждение, лампа начинает работать как генератор, и усиление прекращается.

Исключить вредное действие этой емкости удалось, поместив между первой управляющей сеткой и анодом еще одну, так называемую экранирующую сетку. Эта дополнительная сетка экранирует, защищает основную сетку от поступления с анода усиленных высокочастотных колебаний. Практически ее защитное действие сводится к резкому уменьшению емкости между сеткой и анодом.

Поскольку в такой лампе стало четыре электрода, она получила название тетрод. Но и она оказалась не свободной от недостатков. Выяснилось, что экранирующая сетка слишком усердно помогает разгонять электроны и они так сильно ударяются в анод, что выбивают из оболочек атомов анода так называемые вторичные электроны. Часть этих электронов притягивается обратно анодом, а часть долетает до экранирующей сетки и создает обратный ток. Этот ток обратного направления называют динатронным током, так как явление выбивания вторичных электронов носит название динатронного эффекта.

Динатронный эффект также приводит к самовозбуждению усилителя или сильным искажениям сигнала, поэтому тетрод «царствовал» недолго. Между экранирующей сеткой и анодом поместили еще одну сетку — защитную, или противодинатронную. Роль ее ясна: не пускать вторичные электроны на экранирующую сетку.



Схемы многосеточных и комбинированных ламп

Но третья сетка не только предотвращает последствия динатронного эффекта. Она оказывает на тетрод такое же влияние, как экранирующая сетка на триод: уменьшается емкость между управляющей сеткой и анодом и возрастает усиление лампы, которое, как правило, становится в 10—30 раз бо́льшим, чем у триода. Эта лампа, в которой теперь было уже пять электродов, получила название пентод. Пентод оказался идеальной лампой для усиления высокочастотных сигналов.

Введение четвертой, пятой и шестой сеток было вызвано появлением супергетеродинного метода приема, речь о котором пойдет ниже.

Эти лампы были призваны смешивать и преобразовывать частоты, почему они и получили название смесителей и преобразователей. Кроме того, из-за обилия сеток их часто называют многоэлектродными.

Совершенствование радиоламп шло не только по пути добавления сеток. Появились так называемые комбинированные лампы. В одном стеклянном баллоне и часто над одним катодом размещалось две, а то и три лампы. Например, два диода и триод или два триода и т. д.

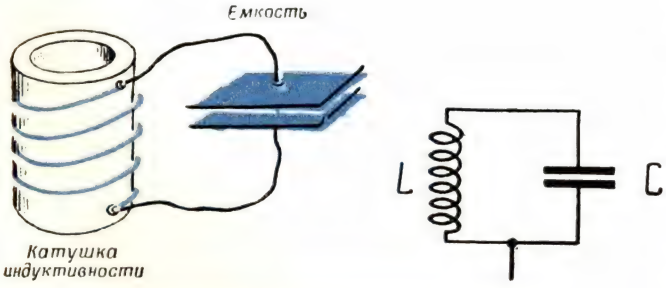
Но комбинированные лампы, хотя и имеют много электродов, существенно отличаются от многоэлектродных. Во-первых, для работы отдельных частей лампы используются различные электронные потоки: сетка каждого триода, например, управляет своим электронным потоком. Иное дело в многоэлектродных лампах: там один электронный поток проходит все сетки, и на него воздействуют все электроды.

Комбинированные лампы очень удобны и практичны, так как резко сокращают необходимое число ламп. При этом сокращается число катодов и, следовательно, расход тока на их нагревание. В период увлечения такими конструкциями пяти-шестиламповый приемник мог иметь всего два баллона, две видимые лампы.

ПОЧЕМУ НА ВОЛНУ МОЖНО НАСТРОИТЬСЯ

Все знают, что на антенну приемника можно поймать любую станцию, стоит только настроить приемник на нужную длину волны. Что же представляют собой радиоволны? Почему на них можно настраиваться?

Электромагнитные колебания можно возбудить в «контуре», т. е. в замкнутой цепи, состоящей из катушки индуктивности и конденсатора. Катушка, или просто индуктивность,— это свитый в спираль провод, а конденсатор — близко расположенные металлические пластины, на которых можно собирать заряды и накапливать, таким образом, электрическую энергию.



Электрический колебательный контур.

Если присоединить батарею к пластинкам конденсатора, то конденсатор начнет заряжаться, на нем появятся электрические заряды.

Пластина, соединенная с отрицательным полюсом, зарядится отрицательно, соединенная с положительным — положительно.

На пластинах появится электрическое напряжение, которое будет возрастать, пока не сравняется с напряжением батареи. Тогда конденсатор окажется заряженным до предела, соответствующего его электрической емкости, т. е. способности запасать электрические заряды. Чем больше емкость, тем больше зарядов при данном напряжении «войдет» в конденсатор, тем большая электрическая энергия сосредоточится в электрическом поле между пластинами заряженного конденсатора. Если отключить батарею, запасенная энергия останется в конденсаторе.

Если теперь заряженный конденсатор присоединить к концам обмотки катушки индуктивности, то он начнет отдавать запасенную энергию, станет разряжаться через катушку. По катушке и по проводам потечет разрядный ток конденсатора.

Известно, что вокруг всякого проводника с электрическим током возникает магнитное поле. Возникает оно и вокруг катушки с током. Электрическая энергия конденсатора превращается в катушке в магнитную энергию электрического тока. В тот момент, когда конденсатор разрядится, магнитное поле достигает наибольшего значения и начинает убывать, пронизывая витки катушки. Энергия, запасенная магнитным полем, разумеется, не может исчезнуть бесследно, она должна перейти в другой вид энергии.

В самом деле, согласно закону магнитной индукции, открытому Фарадеем, уменьшающееся магнитное поле катушки создает в ней электродвижущую силу, которая препятствует исчезновению поля.

Эта электродвижущая сила создает ток, который начинает снова заряжать конденсатор. Но этот зарядный ток будет течь уже в обратную сторону и поэтому перезарядит конденсатор, как бы «поменяв местами» его пластины: положительная зарядится отрицательно, и наоборот. Зарядившийся конденсатор снова начнет разряжаться на катушку, но разрядный ток в цепи будет теперь протекать в другую сторону. Вокруг катушки появится магнитное поле, и

процесс повторится в той же последовательности.

Электрическая цепь, состоящая из катушки индуктивности и конденсатора, называется замкнутым колебательным контуром. В нем происходит периодическое перемещение электрических зарядов, т. е. протекание тока, в противоположных направлениях. Это и есть электрические колебания контура.

Подобно тому как постепенно затухают колебания маятника, так и в контуре после подсоединения заряженного конденсатора колебания через некоторое время прекратятся, затухнут. Основная причина потерь — это электрическое сопротивление проводов, из которых сделан контур. Часть энергии при каждом колебании затрачивается на преодоление этого сопротивления и превращается в тепло. Поэтому с каждым новым колебанием запас энергии контура уменьшается и колебания затухают.

От чего же зависит частота или период электрических колебаний? Период колебания маятника связан с его длиной. Чем больше длина, тем больше период, тем медленнее качается маятник. В часах-ходиках период равен 0,5 сек., а самый большой маятник, подвешенный под стометровым куполом Исаакиевского собора в Ленинграде, совершает полное колебание за 20 сек.

В электрическом контуре длительность периода зависит от величины емкости конденсатора и индуктивности катушки. Чем меньше число витков катушки, тем меньше при данном диаметре ее индуктивность, тем быстрее изменяется сила тока в контуре. Чем меньше емкость конденсатора, тем меньше времени требуется на процесс его разрядки и зарядки. Поэтому чем меньше емкость и индуктивность, тем меньше период колебания, меньше длина волны и выше частота колебаний, тем большее число раз в секунду успеет перезарядиться конденсатор. Меняя величину емкости или индуктивности, легко «настроить» контур на любую частоту. Так и поступают в приемниках: вращая ручку настройки, мы обычно изменяем емкость конденсатора, а значит, и частоту собственных колебаний контура.

Колебания в электрическом контуре совершаются во много раз быстрее, чем качается самый короткий маятник. Перезарядка конденсатора происходит за тысячные и миллионные доли секунды. Это значит, что периоды электрических колебаний так же малы, а частота колебаний составляет тысячи и миллионы раз в секунду.

Для измерения частоты колебаний введена специальная единица — герц (сокращенно *гц*). Один герц означает одно колебание в секунду.

Поскольку в радиотехнике приходится иметь дело с тысячами и миллионами герц, стали применять укрупненные единицы измерения частоты: килогерц (*кгц*) — тысяча герц и мегагерц (*Мгц*) — миллион герц. В соответствии с этим для измерения времени и периодов колебаний пользуются и более мелкими единицами времени: миллисекундой (*мсек*) — тысячной долей и микросекундой (*мксек*) — миллионной долей секунды.

Свойства колебательного контура широко используются в радиотехнике, так как в большинстве случаев только с его помощью можно получить колебания высоких частот, соответствующие используемым в радио длинам волн.

Но электрический контур обладает еще одним важным свойством: он дает возможность использовать так называемое явление резонанса и осуществлять селекцию, т. е. разделение и выделение различных частот. Это и позволяет нам настраиваться на определенную волну и выделять нужную станцию среди огромного количества других.

В электрический контур можно вводить энергию извне. Для этого нужно воздействовать на контур внешней периодической силой, т. е. переменной электродвижущей силой какой-то определенной частоты. Такие колебания, обусловленные внешней силой, носят название вынужденных колебаний.

Если частота вводимой в контур электродвижущей силы равна собственной частоте колебаний контура, возникает явление резонанса — амплитуда колебаний достигает наибольшей величины. Это возрастание амплитуды колебаний не требует увеличения амплитуды подводимого колебания, нужно только, чтобы частота подводимых колебаний равнялась собственной частоте контура.

В чем физическая сущность этого явления?

Попробуем пояснить это сначала на примере маятника. Что нужно, чтобы маятник не останавливался? Очевидно, подталкивать его, причем подталкивать в такт его собственным колебаниям.

Даже если каждый толчок будет слабым, если мы будем передавать маятнику за один толчок небольшую порцию энергии, все равно мы сможем сильно раскачать маятник.

Так же можно раскачать и электрический контур. Для этого нужно подавать в него энергию также в такт и той же частоты.

Контур будет «раскачиваться» только от той частоты, которая соответствует его собственной, т. е. из электроколебаний различных частот он выделит нужную, свою, так как только она одна вызовет явление резонанса, и из маленьких «подталкиваний» контур соберет, накопит значительную энергию.

Конечно, контур не сможет бесконечно собирать «толчки» и увеличивать амплитуду колебаний. Чем больше амплитуда напряжения на контуре, тем больше амплитуда тока, тем больше потери, тем больше энергии рассеивается в виде теплоты. Конечно, разные контуры дают разные потери на одной и той же частоте, а значит, и разную максимальную амплитуду.

Не следует думать, что резонанс контура наступает строго на одной частоте. Каждый, наверное, знает, как иногда в приемнике слышны сразу две станции. Это значит, что контур плохо «разделяет» две станции, что обе близкие частоты одновременно проходят через контур и обе возбуждают достаточно большую амплитуду.

Действительно, каждый контур резко усиливает не одну, а целую «полосу» частот, причем чем выше его добротность, тем у́же полоса частот. Если, например, в паспорте приемника записано, что он имеет полосу пропускания 6 *кгц*, а мы настроились на длинноволновом диапазоне на волну 1500 *м* (200 *кгц*), то мы примем все частоты от 197 до 203 *кгц*.

Между прочим, вещательные станции имеют, как правило, между собой «расстояние» в 9—10 *кгц*. Поэтому полоса пропускания контуров приемников делается несколько у́же, чтобы была возможность отстраиваться от соседних станций.

Ясно представив себе основные свойства электрических контуров и поняв физические процессы, протекающие в электронной радиолампе, можно проследить путь сигналов в простейшем радиоприемнике.

ПРИЕМНИК И ПЕРЕДАТЧИК

Вот сигнал пришел в антенну. Антенна хотя, как правило, и состоит из куска провода, но принципиально это очень широкополосный контур — она принимает сигналы нескольких диапазонов, но зато и резонансные свойства ее выражены слабо, добротность ее низка. В основном антенна служит только для улавливания энергии электромагнитных волн.

Высокочастотное поле радиосигнала наводит в антенне переменные токи высокой частоты, которые затем поступают на входной контур. Как правило, это контур высокой добротности и, следовательно, узкой полосы. Из хаоса частот он выделяет эту единственную узкую полосу частот.

Энергия сигналов, выделенных входным контуром, а следовательно, и напряжение, возникшее на нем, весьма малы. Но поданное на сетку первой усилительной лампы и в несколько сотен раз усиленное, оно появится на контуре, включенном в анодную цепь и настроенном на ту же частоту. С этого контура колебания можно подать на сетку второго триода и усиливать сигнал еще и еще. Пройдя несколько таких «каскадов усиления высокой частоты», колебания становятся в тысячи и миллионы раз сильнее, чем были в приемной антенне.

Теперь их можно подать на детектор. Детекторная лампа выпрямит переменное напряжение, через нее потечет пульсирующий ток постоянного направления, появление которого и просигнализирует о том, что через контуры приемника прошел сигнал той частоты, на которую настроен приемник.

Настройка в подавляющем большинстве случаев осуществляется изменением емкости конденсатора, входящего в контур. Когда каскадов усиления высокой частоты, а значит, и контуров несколько, все емкости нужно менять сразу и на одинаковую величину. Для этого подвижные пластины переменных конденсаторов каждого контура сажают на общую ось и поворачивают одновременно одной ручкой настройки.

Так работают простейшие приемники «прямого усиления», которые долгое время были основными и единственными радиовещательными приемниками. Своим названием они обязаны тому обстоятельству, что высокочастотный сигнал усиливается прямо, без всяких преобразований, на каскадах, все контуры которых настроены на одну частоту.

Контур и лампа в таких системах — это основа усилительного каскада, основа всего приемника. Но не меньшую роль контур и лампа играют в передатчике, генераторе радиочастотных колебаний.

Мы уже говорили о том, что трехэлектродная лампа произвела революцию в радиотехнике. Но настоящий переворот начался несколько позже, когда в 1913 г. было обнаружено, что с помощью триода можно получать, генерировать электрические колебания высокой частоты. Это было поистине революционизирующее открытие.

Ламповые передатчики хорошо настраивались на любую частоту, были просты и надежны и позволяли легко осуществлять передачу речи и музыки. С рождением лампового передатчика радио обрело свой современный вид.

Как же рождаются радиоволны, как работает ламповый генератор?

Колебательный контур генератора включается в анодную цепь лампы, как показано на рис. 2. Рядом с основной катушкой располагается вспомогательная, сеточная. Если в контуре будут происходить незатухающие колебания, направление тока будет периодически меняться, будет меняться и магнитное поле в катушке контура. Появившееся переменное магнитное поле воздействует на витки близко расположенной сеточной катушки и «наводит» в ней переменное напряжение той же частоты.

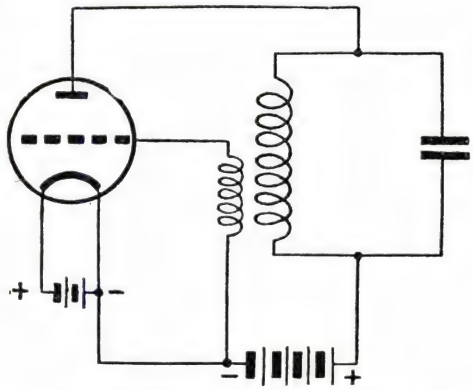


Рис. 2. Схема генератора электрических колебаний.

Это напряжение подается на сетку, которая заряжается попеременно то положительно, то отрицательно. В соответствии с этим автоматически изменяется и ток в анодной цепи.

Эти изменения в свою очередь воздействуют на катушку контура, создавая в нем дополнительные напряжения, не дающие затухать собственным колебаниям контура. По сути дела, на сетку поступает небольшая доля напряжения высокой частоты с контура, усиливается и подается «в такт» снова на контур. Так как в анодную цепь это напряжение приходит усиленным, оно с лихвой покрывает все потери, и колебания не затухают. Контур поддерживает свои колебания за счет энергии анодной батареи, так как из нее черпается энергия на усиление сеточного напряжения, которое в конечном счете идет на покрытие электрических «расходов» контура.

А расходы могут быть не только в виде потерь. Когда хотят излучать колебания, то помещают рядом с основной еще одну катушку — антенную. Тогда и в ней наведется электромагнитное колебание той же частоты и через антенну излучится в пространство. На такие потери расходуется много энергии, но в этом случае ее не жаль: эта энергия пойдет на создание радиосигнала.

КАК РАСПРОСТРАНЯЮТСЯ РАДИОВОЛНЫ

Влияние электрического тока на магнитную стрелку было открыто еще в 1820 г. Но только через одиннадцать лет долгих и трудных поисков великий английский физик Майкл Фарадей сформулировал закон электромагнитной индукции.

Он заметил, что, если перемещать магнит около проволочной катушки, в ней возникает электрический ток.

Так как ток возникает под действием электрического поля, то, следовательно, возникновение этого последнего обязано своим происхождением изменению магнитного поля. Этим опытом было впервые показано единство электрических и магнитных явлений.

В дальнейшем ученые пришли к выводу, что всегда и везде всякое изменение магнитного поля обязательно вызывает появление электрического и, обратно, изменение электрического поля всегда вызывает появление магнитного. Таким образом, было установлено, что электрические и магнитные поля представляют собой одно из проявлений особого вида материи — так называемого электромагнитного поля.

Много важных открытий и выводов в теории электромагнитного поля сделал знаменитый английский физик Максвелл. В 1867 г. он доказал, что, начавшись в одном месте, изменения (колебания) электрического поля распространяются во все стороны все дальше и дальше, подобно тому как волны от брошенного камня распространяются по поверхности воды. В пространстве образуется «электромагнитная волна», которая распространяется, как показали расчеты Максвелла, со скоростью 300 тыс. *км/сек*.

Если через проводник пропустить переменный ток высокой частоты, то вокруг него образуется переменное электромагнитное поле, а так как направление электрических и магнитных сил будет непрерывно меняться в такт с частотой тока, то мы получим высокочастотное переменное электромагнитное поле. При известных условиях переменное электромагнитное поле может терять связь с проводником,

который в этом случае станет излучающей антенной, и распространяться в окружающее пространство.

И наоборот, если мы поместим в электромагнитное поле проводник, то в нем начнет циркулировать переменный ток, разумеется, той же частоты, которой обладает поле. В этом случае проводник станет играть роль приемной антенны.

Если в первом случае проводник отдавал свою энергию распространяющемуся от него во все стороны электромагнитному полю, то во втором случае, когда поле наводит в проводнике переменный электрический ток, оно передает свою энергию проводнику.

Таким образом, высокочастотная энергия может излучаться и распространяться в виде поля и снова «извлекаться» из поля, преобразуясь в переменный электрический ток высокой частоты.

Неоценимым качеством переменных электромагнитных полей или электромагнитных волн является их способность распространяться в пространстве без проводников, да еще со скоростью света. Этим чудесным свойствам электромагнитных волн и обязано радио своими успехами и возможностями.

Электромагнитные волны прекрасно распространяются в воздухе, но присутствие воздуха для них вовсе не обязательно.

Электромагнитные волны различаются по своей длине, или, что одно и то же, по частоте колебаний несущего их переменного поля.

Радиоволны, т. е. электромагнитные волны, использующиеся сейчас в радиотехнике, занимают область, или, как говорят ученые и инженеры, спектр, электромагнитных волн длиной от 10 тыс. *м* (30 *кгц*) до 1 *мм* (300 тыс. *Мгц*).

Но это только часть обширного спектра электромагнитных волн. Свет и радиоволны, тепловые и рентгеновские лучи, ультрафиолетовые лучи, дающие нам загар, и грозные гамма-лучи имеют одну и ту же природу — это электромагнитные колебания, различающиеся только длиной волны.

Сразу за радиоволнами (по убывающей длине волны) следуют тепловые, или инфракрасные, лучи. Именно от них мы закрываем лицо, стоя у открытой печки или пылающего костра. За ними идет узкий участок волн видимого света, сразу за которым следуют ультрафиолетовые лучи. Глаз их уже не видит, но их еще различают фотопластинки. За ними следуют рентгеновские лучи. Как известно, они обладают свойством проникать сквозь такие тела и предметы, которые совершенно непроницаемы для лучей видимого света. Они проходят сквозь ткани человеческого тела, дерево и даже металлы.

Еще дальше расположена область гамма-лучей, испускаемых ядрами атомов радиоактивных веществ при их распаде.

Важно подчеркнуть, что границы между областями спектра выбраны условно и весьма приближенно. Эти области следуют непрерывно одна за другой, переходят одна в другую и в некоторых случаях даже перекрывают друг друга.

Рассмотрим теперь более подробно спектр радиоволн.

Условно, по длинам волн, он разделен на длинные, средние, короткие и ультракороткие волны. Последний диапазон подразделяется еще на метровые, дециметровые, сантиметровые и миллиметровые волны (см. цв. табл. на стр. 472).

Для радиовещания выделены специальные, строго ограниченные участки: 2000—750 *м* на длинноволновом диапазоне, 600—180 *м* на средних волнах, 80—10 *м* на коротких и от 10 до 5 на ультракоротких — это так называемые вещательные диапазоны.

Другие участки радиоспектра предназначены для радиотелеграфной связи, для радиосвязи с самолетами, радиомаячной, морской и других специальных радиослужб.

На волне 600 *м* передается знаменитый сигнал «SOS» — сигнал бедствия. На этой волне работают все аварийные передатчики.

Короткие волны служат для дальних магистральных связей. На метровых волнах ведутся телевизионные передачи. Дециметровые и сантиметровые волны использует радиолокация, радионавигация, радиогеодезия. Миллиметровые волны последнее время все шире применяются в радиолокации, радиоспектроскопии и в специальных физических исследованиях.

Любые радиоволны могут при помощи антенны излучаться в пространство и распространяться в виде энергии электромагнитного поля без проводов, однако волны различной длины распространяются не одинаково и требуют различных размеров антенн.

Земля представляет собой проводник электричества, хотя и не очень хороший. Радиоволны, проходя над землей, возбуждают в ней электротоки, на создание которых тратится часть энергии электромагнитных волн. Эта энергия поглощается землей, и радиоволны постепенно ослабевают.

Кроме того, радиоволна ослабевает и потому, что энергия излучения передатчика расходится во все стороны пространства, и чем дальше от передатчика, тем меньше будет приходиться энергии на одну и ту же площадь, тем меньше энергии сможет принять одна и та же антенна.

Чем короче волна, тем сильнее она поглощается земной поверхностью, тем меньшее расстояние она проходит над землей. Не удивительно поэтому, что в первые годы развития радиотехники для дальней связи применяли волны длиной от одного до 30 *км*. Волны короче 100 *м* считались непригодными для дальней связи, и их отвели радиолюбителям.

Дело в том, что передачи длинноволновых станций можно принимать на расстояниях до нескольких тысяч километров, причем громкость приема уменьшается плавно, без скачков. То же справедливо в отношении средних волн, правда, они распространяются в пределах одной тысячи километров. Зато ночью слышимость средневолновых станций резко возрастает. Что же касается коротких волн, то их энергия по мере удаления от передатчика резко убывает, так как они сильно поглощаются земной поверхностью.

Ученые занялись исследованиями условий распространения и свойств коротких и ультракоротких волн. Оказалось, что, идя у поверхности «земным лучом», такие волны действительно быстро затухают. Но, распространяясь вверх под бо́льшими углами к горизонту, короткие волны не уходят в пространство, а возвращаются обратно!

Почему? От чего они могут отразиться, от облаков? А как же в ясную погоду?

Для того чтобы разобраться во всех этих вопросах, нужно было изучить свойства окружающей Землю воздушной оболочки.

ИОНОСФЕРА

Нашу планету окружает воздушный океан именуемый атмосферой. Нижняя его прослойка, вплотную примыкающая к земной поверхности,— тропосфера — легко поддается изучению.

Следующий по высоте слой атмосферы — стратосфера,— простирающийся от 15 до 70 *км*, также сравнительно хорошо изучен с помощью шаров-зондов и других методов.

И только свойства более высоких слоев воздуха до последнего времени оставались почти совершенно неизвестными. Серьезное изучение этой части атмосферы, имеющей огромное значение для радиосвязи, началось лишь в последние годы, после появления мощных ракет и искусственных спутников Земли.

Основную сумму сведений об ионосфере ученые получили путем косвенных измерений и наблюдений за различными физическими процессами, главным образом за особенностями распространения электромагнитных колебаний на этих высотах.

Усиленное изучение ионосферы началось после того, как было выяснено, что радиоволны определенной длины преломляются в ней и отбрасываются на Землю. Благодаря этому явлению в двадцатых годах радиолюбителям удалось провести передачи на огромные расстояния, причем на коротких волнах, которые в то время считались «бросовыми», непригодными для радиосвязи.

В 1921 г. французский радиолюбитель на волне 20 *м* принял передачу маломощной американской станции, перекинув, таким образом, первый радиомост между Европой и Америкой. Такие приемы с Американского континента стали все чаще и чаще, а через год была уже установлена двусторонняя радиосвязь через Атлантику.

Секрет дальнодействия коротких волн заинтересовал радиофизиков. Еще в 1902 г. американский ученый Кеннели и английский ученый

Земля окружена слоем воздуха, проводящим и отражающим радиоволны.

Хевисайд высказали предположение, что на большой высоте должен быть слой воздуха, проводящий и отражающий радиоволны. Сверхдальние радиолюбительские связи подтвердили эту догадку, а современная наука точно установила наличие отражающих радиоволны ионизированных слоев воздуха.

Какими же особенными свойствами наделены высокие слои воздуха, чем они отличаются от нашего обычного, «земного» воздуха? Прежде всего, чем выше от Земли, тем воздух более разрежен. Меньшая плотность воздуха, конечно, никак не сказалась бы на распространении радиоволн, но, оказывается, с высотой резко меняются электрические свойства воздуха: из изолятора он становится проводником электричества.

Чем же это объясняется?

РОЖДЕНИЕ ИОНОВ

Как мы уже говорили, газы, входящие в состав воздуха, как и все другие вещества, состоят из атомов и молекул. Известно также, что молекулы состоят из атомов, а те в свою очередь — из электронов, обращающихся вокруг тяжелого и сложного ядра. Электроны несут на себе отрицательный заряд, а ядро заряжено положительно, причем общий заряд ядра равен зарядам всех электронов. Таким образом, хотя отдельные части атома связаны электрическими силами, в целом атом в нормальном состоянии не имеет заряда — отрицательный заряд электронных оболочек уравновешивает положительный заряд ядра. То же самое можно сказать и о молекуле — в нормальном состоянии она нейтральна.

Однако атом, а значит, и молекула, содержащая этот атом, могут в известных условиях терять один или несколько электронов. Тогда положительный заряд ядра будет превышать заряд электронов. Атом и молекула окажутся заряженными положительно.

Может произойти и наоборот — атом захватит «лишний» электрон и зарядится отрицательно. Атомы и молекулы, имеющие электрический заряд, называются и о н а м и.

От этого слова и произошло название и о н о с ф е р а — шаровая воздушная оболочка Земли, состоящая из ионизированных газов.

Наличие свободных электронов и заряженных ионов сообщает газу способность проводить электрический ток.

Что же заставляет электроны покидать свои атомы и молекулы, с которыми они связаны весьма прочно? И почему такой процесс идет только на больших высотах?

Дело здесь состоит вот в чем. В мощном потоке лучей солнечного света есть невидимые ультрафиолетовые лучи. Большая часть этих лучей совсем не доходит до земной поверхности, так как их поглощают частицы газов в верхней атмосфере. Поглощение энергии атомами сопровождается их расщеплением. При образовании свободных электронов и ионов энергия ультрафиолетовых лучей расходуется на ионизацию молекул и атомов.

Но не только ультрафиолетовые лучи Солнца вызывают ионизацию. Излучения некоторых звезд еще богаче ультрафиолетовыми лучами, и, хотя из-за огромных расстояний их действие в тысячи раз слабее, они вносят свою долю ионов. Ультрафиолетовые лучи этих звезд особенно важны в период долгих зимних ночей, когда в ионосферу подолгу не попадают солнечные ультрафиолетовые лучи.

От Солнца доходит к нам также поток мельчайших частиц, так называемых корпускул. Эти осколки ядер, протоны, электроны и другие частицы обладают огромной энергией и, сталкиваясь с частицами газа, производят ионизацию верхних слоев атмосферы. Верхние слои атмосферы принимают, так сказать, основной ионизирующий удар, поглощают основную часть энергии ультрафиолетового и корпускулярного излучения Солнца и звезд и поэтому почти не пропускают их в нижние слои.

Разноименно заряженные частицы не живут вечно, они сталкиваются между собой и нейтрализуются, в результате чего количество свободных электронов и ионов уменьшается. Но такой процесс воссоединения ионов и электронов идет по-разному на разных высотах. В нижних слоях, где воздух плотнее и частиц больше, столкновения происходят чаще и воссоединение идет быстрее. В более высоких слоях образование нейтральных атомов и молекул идет очень медленно, а непрерывное облучение создает все новые и новые ионы, в результате чего Земля всегда окружена слоем ионосферы.

СТРОЕНИЕ ИОНОСФЕРЫ

Но ионосфера неоднородна. Многолетние исследования ученых с помощью «наземных» методов позволили установить, что в ионосфере есть четыре главных слоя, обозначаемых буквами латинского алфавита D, E, F_1 и F_2.

Слой D образуется только днем; высота его над Землей — 60—70 *км*.

Следующий слой — E. Это самый устойчивый слой ионосферы, расположенный примерно в 110 *км* над Землей.

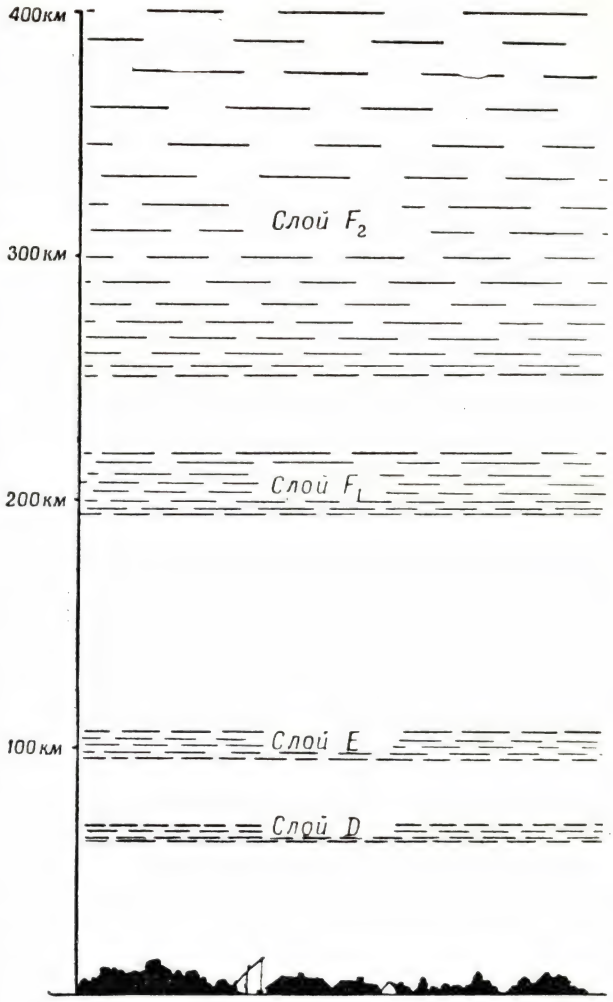
На высоте 200 *км* расположен слой F_1, который появляется, так же как и слой D, только днем и преимущественно летом. Ночью же, а также зимой он как бы поднимается к самому высокому слою F_2 и сливается с ним.

F_2 — последний слой, самый обширный, но в то же время самый неустойчивый, простирается от 250 до 400 *км* и выше.

Самые разнообразные способы применяют ученые для изучения состава газов, плотности их, температуры и других физических свойств высоких слоев атмосферы. Наблюдая за тем, как меняется яркость неба в сумерки после захода солнца, ученые установили, как меняется плотность воздуха на разных высотах. А зная плотность, сравнительно легко можно определить температуру и давление.

Химический состав верхних слоев воздуха удается определить, изучая спектральный состав свечения ночного неба. Оказывается, в безлунную ночь небо имеет значительно большую яркость, чем та, которую дают ему все звезды вместе взятые; этот добавочный свет называется свечением самой атмосферы. Академик В. Г. Фесенков в 1946 г. определил, что излучающий слой расположен на высоте 270 *км*.

Спектральный анализ этого свечения позволил выяснить, какие газы и в каком состоянии находятся в верхних слоях атмосферы. Легких газов на большой высоте почти нет. Как и внизу, воздух там состоит из кислорода и азота. Свечение газов ионосферы объясняется тем, что при воссоединении и нейтрализации ионов энергия ультрафиолетовых лучей, затраченная на расщепление молекул, вновь выделяется в виде световых лучей. Последними исследованиями с помощью спутников установлено, что названные четыре слоя не являются стабильными образованиями, постоянно окружающими Землю. Более правильно говорить об определенных неоднородностях ионосферы, существование которых зависит от времени года и суток, от величины солнечной активности и ряда других причин.



Четыре слоя ионосферы.

ПОЛЯРНЫЕ СИЯНИЯ

Но известна и другая форма свечения ионосферных газов — это знаменитые полярные сияния. Они происходят главным образом у полюсов Земли, где они бывают до 100 раз в году. В Ленинграде их видят пять, а в Москве — один-два раза в год.

Ученые измерили высоты, на которых происходит свечение газов, создающих сияния. Расчеты показали, что нижняя граница находится, как правило, на высоте 100 *км*, а верхняя простирается до 300—500 *км*, а иногда и до 1000—1100 *км* (см. цв. табл. на стр. 473). Полярные сияния оказались прекрасным инструментом для изучения ионосферы. Разыгрываясь во всей ее толще, излучая достаточно сильный свет, они позволяют по спектральной картине определить состав светящихся газов, его температуру, а также степень его ионизации.

Спектральный анализ полярных сияний показал, что кислород в высоких слоях находится в виде атомов, а не молекул — это результат действия солнечных излучений, которые не только ионизируют молекулы, но и разбивают их на отдельные атомы.

Иную спектральную картину показывает азот. В спектре сияний он дает систему полос, а не линий. Это является признаком того, что источником излучения служат молекулы. Правда, последние наблюдения показали наличие в самых верхних слоях ионосферы также и атомарного азота.

Первое научное объяснение полярных сияний дал М. В. Ломоносов. В своей работе «Слово о явлениях воздушных, от електрической силы происходящих» он высказал мысль о том, что полярные сияния порождаются электрическими силами. Ломоносов провел известный опыт, в котором, действуя электричеством на разреженный воздух, заключенный в стеклянном шаре, получил свечение, напоминавшее полярное сияние.

В опыте Ломоносова ионы газа разгонялись приложенным электрическим напряжением и, сталкиваясь с молекулами, ионизировали их, создавая все более мощный поток ионов. Часть энергии при столкновении частиц расходуется на возбуждение их и сопровождается излучением света. Примерно то же происходит в ионосфере. Быстрые солнечные корпускулы, влетая в земную атмосферу, сталкиваются с частицами воздуха, возбуждают их и заставляют светиться.

Почему же сияния происходят главным образом в полярных областях?

Потому, что Земля — гигантский магнит, ее магнитное поле отклоняет заряженные корпускулы от прямолинейного пути, и они попадают в полярные области.

Солнце вызывает в ионосфере хотя и невидимое, но не менее грандиозное явление магнитных бурь, которые всегда сопровождают полярные сияния. Поток корпускул, летящих от Солнца, по существу представляет собой электрический ток, так как это поток заряженных частиц. А электрический ток всегда порождает в окружающем пространстве магнитное поле. Поток солнечных частиц вызывает бурную ионизацию и, следовательно, появление огромного количества заряженных частиц. Образуются целые облака зарядов, которые, перемещаясь в ионосфере, порождают сильные электрические токи. Токи эти очень сильны: порождаемые ими магнитные поля, накладываясь на поле Земли, настолько сильно искажают его, что стрелки компасов перестают указывать на север, радиосвязь прекращается из-за сильнейших помех, а иногда нарушается и телеграфная связь.

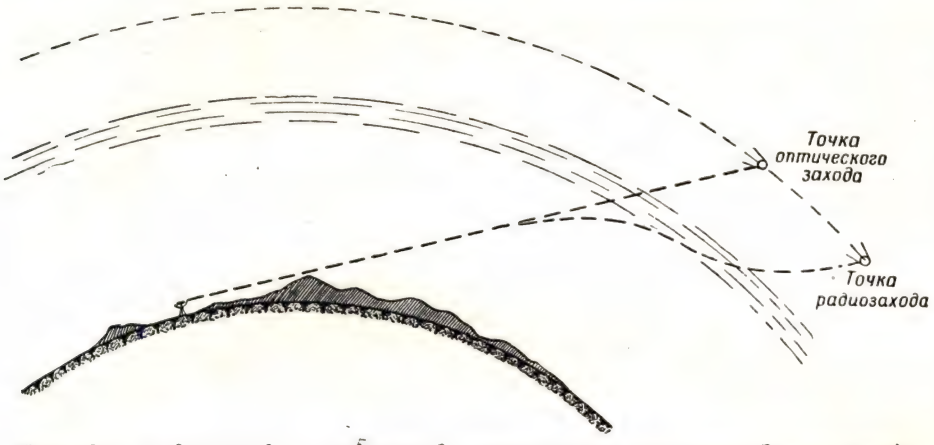
Полярные сияния и магнитные бури — это «отголоски» взрывов и извержений газообразного вещества Солнца, так называемых солнечных пятен. Из тех областей солнечной поверхности, где появляются пятна, вырываются мощные потоки ультрафиолетовых лучей и огромное количество корпускул, которые достигают Земли и воздействуют на ионосферу. Ультрафиолетовые лучи, распространяясь со скоростью света, достигают Земли значительно быстрее корпускул, которые затрачивают на свое путешествие до Земли от 20 до 60 часов. Все это время, пока длится «прибытие» частиц, в ионосфере происходят описанные выше бурные явления.

В настоящее время широкое распространение получил метод «прощупывания» ионосферы с помощью радиоволн — так называемый метод радиоэха. Он состоит в следующем. Передатчик ионосферной станции посылает вертикально вверх короткие порции радиоволн, а приемник улавливает их после отражения от ионосферных слоев.

Измерив время, затраченное радиоволной на прохождение туда и обратно, и зная скорость ее распространения, легко определяют высоту слоя. Первая такая станция была построена в СССР в 1932 г. в Мурманске известным русским ученым М. А. Бонч-Бруевичем.

Современные станции достаточно сложны, почти полностью автоматизированы и дают полную картину состояния ионосферы. Излучаемая волна автоматически плавно меняет свою длину в диапазоне коротких волн, а вместе с этим так же плавно меняется настройка приемника. Так за несколько минут, а иногда и секунд поочередно прощупываются все слои ионосферы. Это позволяет исследовать быстропеременные процессы и наиболее полно судить о физическом состоянии ионосферы.

Таблица 27. В верхней части рисунка изображен спектр электромагнитных колебаний. Как видно из приведенных на схеме цифр, радиоволны занимают значительную область в его начальной части. В средней части таблицы представлен спектр радиоволн; показано, каким образом и на какие диапазоны он разбит, где и какие волны находят применение.



Наблюдая «радиовосход» и «радиозаход» искусственных спутников Земли, ученые получили возможность изучать особенности прохождения радиоволн через ионосферу.

Наступившая эра искусственных спутников и космических полетов открыла новые, блестящие возможности в изучении строения ионосферы. Радиоволны со спутника прощупывают ионосферу насквозь, причем за 1,5 часа прощупывается атмосфера вокруг всей Земли и практически на всех широтах.

Особенно много ценных сведений получено в 1957—1958 гг. во время Международного геофизического года. Ученые более 40 государств одновременно по согласованным программам проводили подробное изучение ионосферы с помощью спутников, высотных ракет и ионосферных станций. Все это значительно расширило наши знания об ионосфере и о законах распространения коротких радиоволн.

ИОНОСФЕРА И РАСПРОСТРАНЕНИЕ РАДИОВОЛН

Теперь мы сможем ответить на поставленный выше вопрос — как распространяются в ионосфере радиоволны.

Прежде всего нужно сказать, что волны разной длины распространяются по-разному.

Короткие волны, например, преломляются в ионосфере, отклоняются от своего первоначально прямолинейного пути, искривляются и возвращаются на Землю.

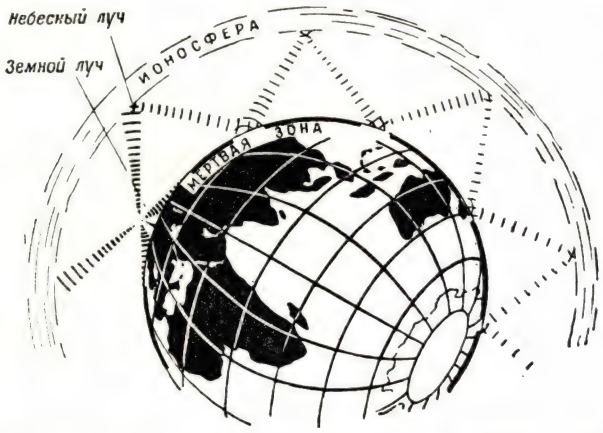
Но степень преломления зависит в первую очередь от длины волны. Более длинные волны преломляются сильнее, более короткие — слабее. Дальше всего с помощью ионосферы распространяются короткие волны длиной от 8 до 15 *м*.

Представление о том, что чем короче волна, тем в меньшей степени она может «огибать» земной шар, не претерпело изменений. Действительно, путь короткой волны короток — он измеряется десятками километров. Далее начинается «мертвая зона». Поверхностные волны сюда не доходят, а преломленные в ионосфере возвращаются на Землю на большом расстоянии от передатчика за пределами «мертвой зоны», которая может измеряться сотнями километров. Но, пропутешествовав через ионосферу, волна не «успокаивается». Коснувшись Земли, она отражается от ее поверхности и снова устремляется к ионосфере, где отражается снова, и т. д.

Так, путем многократных отражений, радиоволна может несколько раз обогнуть земной шар.

По-иному ведут себя ультракороткие волны. Если сравнительно длинные волны преломляются в ионосфере, то волны короче 10—15 *м* пронизывают ее насквозь и безвозвратно уходят в межпланетное пространство. Из всех видов радиоволн ультракороткие волны стоят в спектре электромагнитных волн ближе всего к световым лучам, поэтому у них много сходства. Они почти не огибают земной поверхности и распространяются прямолинейно в пределах прямой видимости. Поэтому дальность действия ультракоротковолновых станций невелика. Однако нельзя сказать, чтобы эти волны были бесполезны для радиосвязи. Наоборот, их использование имеет много преимуществ.

Таблица 28. Земля окружена атмосферной оболочкой. Только на 40 *км* поднимаются для ее исследования шары-зонды. Еще ниже лежит «потолок» самолетов. На 200—470 *км* поднимают приборы исследовательские ракеты. Выше пролегают орбиты искусственных спутников Земли. На высоте от 100 до 1000 *км* происходят полярные сияния; на высотах порядка 80—120 *км* сгорают метеоры — «падающие звезды». На высоте 70 *км* над Землей начинается ионосфера.



Распространение коротких радиоволн. В местах падения луча на Землю находятся зоны слышимости. Между ними расположены «мертвые зоны».

Поскольку такие волны распространяются только в пределах прямой видимости, они не мешают работе других радиостанций, использующих те же волны и расположенных за горизонтом.

Поэтому уже на расстоянии 150—300 *км* можно устанавливать другую станцию, работающую на той же волне, — помех не будет. Это означает, что одна и та же частота может быть использована многократно, а общее количество радиостанций — во много раз увеличено.

Но есть еще одно обстоятельство, позволяющее работать на ультракоротковолновом диапазоне сразу огромному числу станций. Дело в том, что узкий диапазон волн длиной от 10 до 5 *м* охватывает полосу частот от 30 до 60 *Мгц*, т. е. 30 *Мгц*. В то же время весь диапазон длинных и средних волн (2000—200 *м*) соответствует частотам от 1,5 до 15 *Мгц*, т. е. всего 13,5 *Мгц*. Это значит, что чем короче волна, тем больше станций разместится на «одном метре».

Мы уже говорили о том, что частоты соседних радиовещательных станций отличаются друг от друга на 9—10 *кгц*. Отсюда следует, что для нормальной работы станции, т. е. для того, чтобы в полосу пропускания одной не «залезал» частотный спектр другой станции, полоса каждой должна быть несколько меньше, чем 9 *кгц*.

Поэтому ультракоротковолновый диапазон открывает для радиосвязи неограниченные возможности: его полоса частот составляет примерно 30 миллионов килогерц. В ней можно расположить в 1000 раз больше радиостанций, чем в диапазонах длинных, средних и коротких волн, вместе взятых.

Ультракороткие волны, называемые обычно УКВ, обладают еще одним интересным и важным свойством, которому они обязаны своей малой длиной и близостью к световым лучам.

Вспомним, что происходит в автомобильной фаре или прожекторе. Свет от лампочки, расположенной в фокусе рефлектора, собирается в узкий пучок лучей, который можно послать в любом направлении, причем яркость такого сфокусированного пучка намного превышает яркость лампочки.

Примерно то же самое можно проделать с радиоволнами УКВ диапазона. Можно построить зеркала-антенны, собирать и посылать радиоволны узкими пучками.

Построить такую антенну для длинных волн невозможно — слишком велики были бы ее размеры, так как диаметр зеркала должен быть намного больше длины волны. Чем меньше длина волны, тем легче создать направленную антенну, тем в более узкий и «яркий» пучок можно собрать радиоволны.

Эта особенность позволила успешно использовать ультракороткие волны в первую очередь для радиолокации, радиорелейной связи, телевидения и других областей, требующих направленного излучения.

И еще одно свойство выгодно отличает волны УКВ диапазона — малые помехи радиоприему. Этим, в частности, объясняется то, что в последние годы даже дешевые приемники наряду с обычными диапазонами снабжаются одним или несколькими ультракоротковолновыми диапазонами.

Самые короткие волны радиоспектра — миллиметровые — обладают всеми особенностями распространения УКВ, но, в отличие от них, сильно поглощаются атмосферой. Для волн короче 1 *см* туман, дождь, облака уже являются помехой и сильно ограничивают дальность распространения.

Правда, для некоторых длин волн имеются «окна» и более короткие волны ослабляются меньше, чем более длинные.

Волны короче 1 *мм* очень сильно затухают в атмосфере также за счет молекулярного поглощения. Только в области видимого света (длина волны около 1 микрона) появляется «оптическое окно».

Такие же «окна» имеются и в спектре инфракрасных (тепловых) лучей.

Таким образом, мы видели, что волны радиодиапазона ведут себя по-разному, обладают разными свойствами распространения, и поэто-

му каждый участок этого диапазона находит свое специальное применение там, где лучше всего могут быть использованы его особенности.

СОВРЕМЕННЫЕ РАДИОЛАМПЫ

С рождением первых многоэлектродных радиоламп мы уже познакомились в начале этой статьи. Там же говорилось о том, что ярко светившие радиолампы постепенно «угасли» благодаря появлению подогревных активированных катодов.

Но еще долго радиолампа была похожа на обычную осветительную: цоколь венчал более или менее внушительный стеклянный пузырь — баллон лампы. Постепенно баллоны «худели», из шарообразных становились цилиндрическими, диаметр их перестал превышать размеры цоколя, и, наконец, лампу заключили в металлический баллон. Здесь она окончательно потеряла способность светить.

Но размеры радиоламп продолжали уменьшаться, а увлечение металлическими баллонами-оболочками постепенно прошло. Большинство ламп снова стало стеклянными, но размеры их настолько уменьшились, что цоколь уже просто нельзя было приделать к такой малогабаритной лампе. Цоколь получился бы слишком большим, и лампа потеряла бы свое основное достоинство — малые размеры.

Появились пальчиковые лампы. Название не совсем точно отражает их размеры: если в диаметре они действительно не толще пальца, то в длину — в два-три раза меньше. Вслед за пальчиковыми конструкторы создали субминиатюрные, сверхминиатюрные лампы, толщиной не более карандаша, причем, разумеется, качество радиоламп при этом не снижалось, а росло.

Если осветительная лампочка обычно ввинчивается своим цоколем в патрон, то радиолампа, как, очевидно, многим известно, вставляется в специальную ламповую панель своими многочисленными штырьками — «ножками», к каждой из которых подсоединен свой электрод. Штырьки в лампах «старинных» и металлических серий заделаны в цоколь из хорошо изолирующего материала. Чтобы ножки лампы могли попасть только в «свои» гнезда, цоколи снабжаются разнообразными «ключами», которые не позволяют вставить лампу неправильно. Обычно это круглый штырь с выступом. В панельке имеется отверстие для штыря и паз для выступа, так что лампу можно вставить только тогда, когда паз совпадает с выступом и, следовательно, когда каждый штырь окажется против своего гнезда.

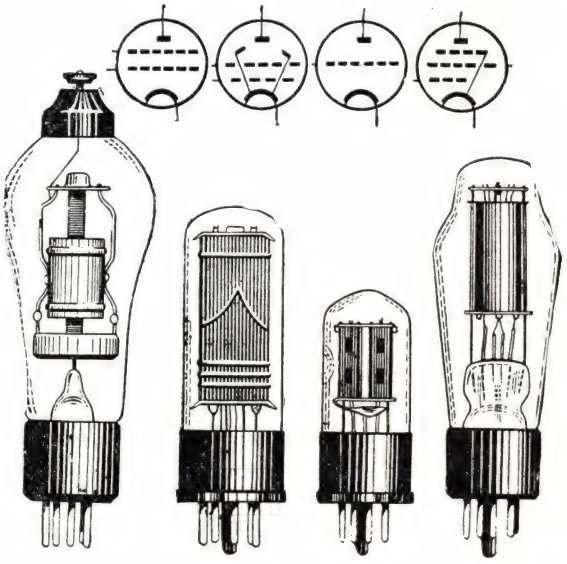
У пальчиковых ламп цоколя уже нет, но штырьки еще есть; они впаяны прямо в дно самой лампы. А сверхминиатюрные лампы уже не имеют ножек-штырей, и выводы от электродов осуществляются мягкими проводниками, которые выходят из сплющенного «хвоста» лампы.

Созданы и совсем крошечные лампы — чуть больше рисового зерна. Это, как правило, диоды или триоды, и хотя они по размерам могут успешно соперничать с кристаллическими приборами, но из-за малой практичности применяются редко.

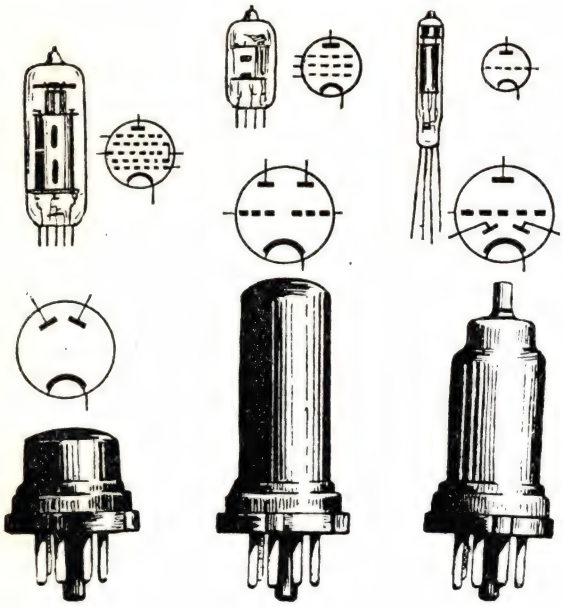
Полную противоположность таким лампам с точки зрения размеров представляют собой мощные генераторные радиолампы, применяемые на радиотрансляционных узлах и передающих вещательных станциях. Размеры их доходят чуть ли не до человеческого роста, а огромная мощность, выделяющаяся на анодах, заставляет применять водяное охлаждение.

Но если обычные триоды, пентоды и т. д. постепенно приобрели крошечные размеры, сохранив все свои особенности и свойства, то с переходом на все более короткие волны потребовались и принципиально новые типы ламп.

Мы уже говорили, что при усилении длинных, средних и коротких волн электронную лампу можно было считать безынерционным прибором, мгновенно реагирующим на все изменения тока, как бы часто они ни проис-



Стеклянные лампы.



Металлические и малогабаритные лампы.

ходили. Действительно, время пролета электронов от катода до сетки было значительно меньше периода применяемых частот. По сравнению со скоростью электрона частота даже коротких волн — это медленный процесс.

Но на огромных частотах, соответствующих волнам УКВ диапазона, временем пролета электронов в лампе пренебрегать уже нельзя: оно стало соизмеримым с периодом изменения тока сверхвысоких частот. Так, при волне в 1 *м* (300 тыс. *кгц*) время пролета электрона до сетки (0,003 *мксек*) становится равным периоду колебания, а при волне 10 *см* — уже в 10 раз больше его.

Значит, электрон, вылетевший из катода в тот момент, когда сетка заряжена положительно и притягивает его, еще не долетев до сетки, перестанет испытывать это притяжение, и, наоборот, подвергнется отталкиванию и торможению, потому что напряжение на сетке уже успеет переменить свой знак.

Конструкторы начали уменьшать расстояния между электродами, а также уменьшать междуэлектродные емкости и индуктивности выводов. Так появились лампы типа «желудь». Расстояния между электродами в них сокращены до предела, а выводы расположены по окружности баллона, что сделало их короче и уменьшило индуктивность, а также и взаимную емкость. В результате таких конструктивных улучшений «желуди» эффективно работают на волнах до 1 *м*.

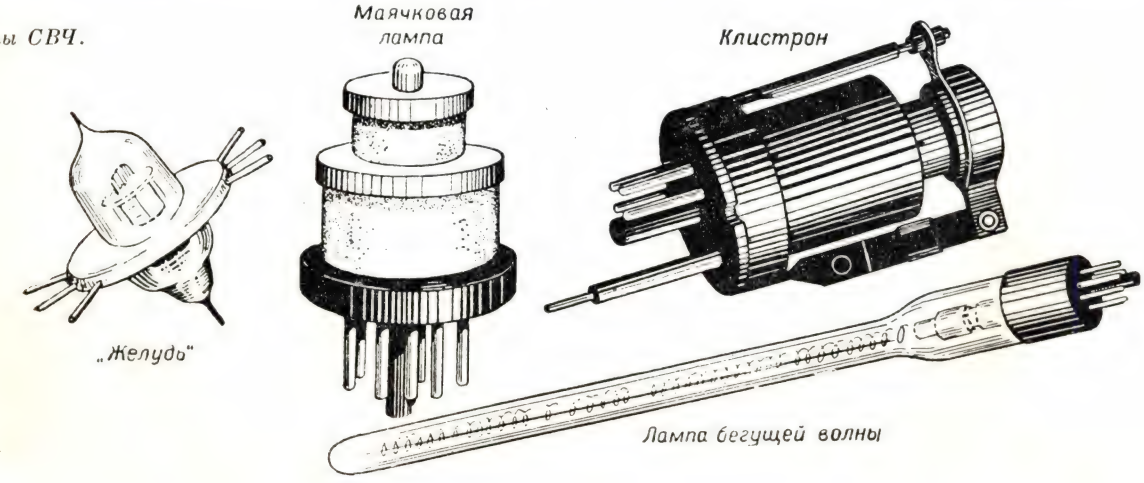
Для волн 10—20 *см* пришлось создать уже совсем необычные «маячковые лампы». Выводы катода сетки и анода сделаны здесь в виде дисков и проходят прямо через стекло баллона наружу: через штырьки в цоколе подводится только напряжение накала.

Но «желуди» и даже маячковые лампы не решили проблемы получения больших колебательных мощностей в передатчиках сверхвысоких частот и совсем не работали в диапазоне 2—3 *см*.

Эту задачу позволили решить лампы с принципиально новым способом управления электронным потоком.

Первой лампой такого типа явился магнетрон. У магнетрона всего два электрода — катод и анод, на который подается напряжение в не-

Лампы СВЧ.



сколько тысяч вольт. Сетки у магнетрона нет. Неотъемлемой частью лампы, определившей ее название, является мощный постоянный магнит, расположенный таким образом, что силовые линии создаваемого им поля оказываются направленными параллельно катоду. Известно, что магнитное поле искривляет путь движущихся в нем электронов, если только направление их движения не совпадает с направлением магнитных силовых линий.

В магнетроне поле действует на электроны с наибольшей силой, так как они летят в направлении, перпендикулярном силовым линиям поля. Подбирая соответствующее магнитное поле и напряжение на аноде, можно заставить электроны двигаться по кругу у самой поверхности анода. Конструкция этой лампы так и выполнена, чтобы обеспечить существование кругового потока электронов. Круглый цилиндр катода окружен массивным анодом. Электроны, вылетающие из катода, отклоняются полем магнита и пополняют ряды электронного потока, отдающего свою энергию на поддержание высокочастотных колебаний. Где же создаются эти колебания?

Магнетрон сам генерирует электромагнитные колебания, ему не нужен, как триоду, контур с проволочной катушкой связи. Его анод представляет собой массивное медное кольцо с многочисленными цилиндрическими камерами — объемными резонаторами, которые посредством узких щелей сообщаются с пространством вокруг катода, где создается круговой поток электронов. Объемные резонаторы и есть колебательные контуры для сверхвысоких частот. Такие контуры были впервые предложены советским ученым М. С. Нейманом. Частота колебаний, возникающих в резонаторах, определяется их размерами. Электроны, которые движутся вблизи щелей анода, ведущих к резонаторам, возбуждают в последних колебания, отдавая при этом свою энергию. Потеря энергии приводит к потере скорости электронов, которые взаимодействовали с резонаторами, и уплотнению потока электронов при проходе их мимо щелей. При надлежащем подборе всех геометрических размеров, напряжения и величины магнитного поля эти «уплотнения электронного потока» будут пролетать мимо щелей резонаторов как раз в те мгновения, когда они «в такт» сообщают энергию колебаниям объемного контура, и будут, следовательно, поддерживать эти колебания. В результате в резонаторах установятся незатухающие колебания большой мощности.

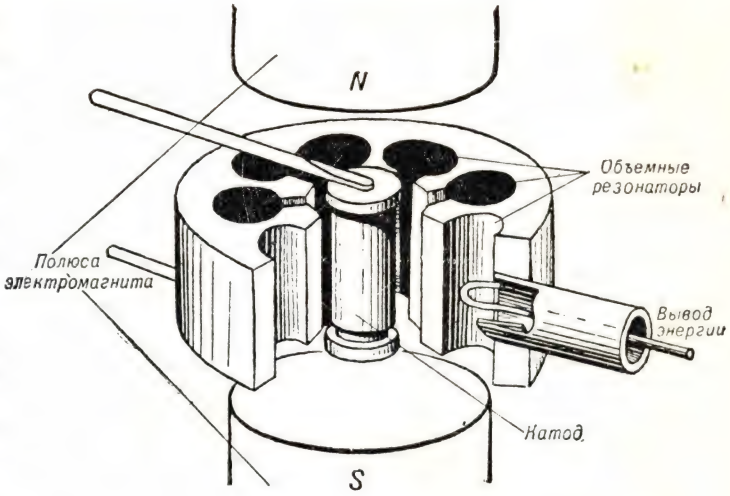


Схема магнетрона.

В магнетронах удается получать колебания сверхвысоких частот с длиной волны до 0,5 *см*. Первое применение магнетроны нашли на радиолокационных станциях, и до сих пор без них не обходится ни один радиолокатор.

Другим прибором для генерирования ультракоротких волн, также объединяющим в себе функции лампы и контура, является клистрон. В отличие от магнетрона это, как правило, маломощный генератор, хотя по общим принципам работы клистрон и подобен магнетрону. Резонаторы у него тоже выполнены вместе с лампой, а колебания в них также поддерживаются потоком электронов неодинаковой плотности.

Поток здесь не кольцевой, как в магнетроне, а прямолинейный, поэтому электроны излучаются катодом в одном направлении, ускоряются специальным электродом и пролетают мимо резонатора.

Наиболее часто применяются так называемые отражательные клистроны, где поток электронов, пролетевший мимо резонатора и разделенный им на зоны уплотнения и разрежения, встречает на своем пути электрод, заряженный отрицательно, и, отразившись от него, направляется обратно в резонатор.

При правильном подборе напряжений чередование сгустков электронов совпадает с частотой резонатора, и они будут «в такт» отдавать ему свою энергию. Клистроны генерируют те же частоты, что и магнетроны. Кроме радиолокации, они применяются для создания сверхвысоких частот в радиоэлектронике.

Третий тип ламп, широко применяющийся в диапазоне сантиметровых волн, именуется: «лампы бегущей волны» и «лампы обратной волны».

Какая же волна «бежит» в этой лампе?

Электромагнитное поле распространяется, как известно, со скоростью света, а электронам даже при громадных напряжениях в несколько тысяч вольт можно сообщить скорость не больше $\frac{1}{10}$ скорости света. Поэтому, для того чтобы использовать взаимодействия магнитного поля и электронного потока, на чем и основан принцип работы этих ламп, необходимо как-то замедлить распространение электромагнитной волны и уменьшить ее скорость до скорости электронного потока, тем самым обеспечив эффективное взаимодействие между ними.

Такая лампа похожа на длинную пробирку с цоколем. По всей ее длине идет спираль, по проводу которой движется электромагнитная волна. Вместе с волной обегает витки спирали со скоростью света и электромагнитное поле. Но вдоль спирали, по ее оси, поле перемещается во столько раз медленнее, во сколько раз длина провода одного витка больше шага спирали.

Там же внутри спирали по ее геометрической оси пропускают пучок электронов. Когда сигнал, т. е. электромагнитное колебание, идет по началу спирали, он воздействует на равномерный поток электронов, перегруппировывая в нем электроны по их скоростям. Сгруппированный поток, продвигаясь вдоль спирали, сам воздействует «в такт» на электромагнитное поле и, отдавая ему свою энергию, усиливает его. По мере продвижения по спирали поле непрерывно усиливается, и если лампа, т. е. ее спираль, имеет достаточную длину, выходное напряжение значительно превысит входной сигнал.

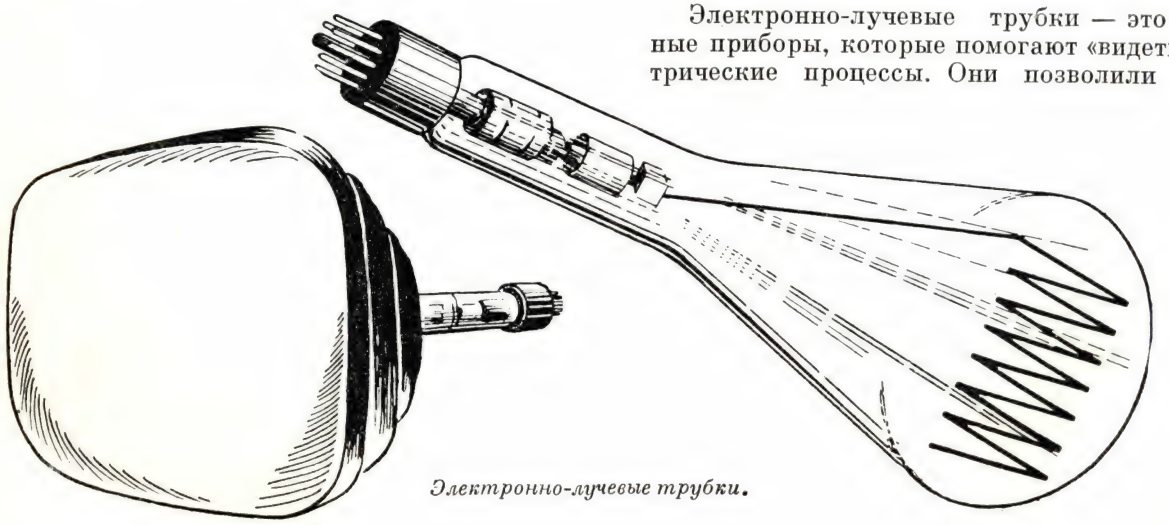
Лампы бегущей волны могут усиливать волны длиной от двадцати до десяти и даже до трех сантиметров, чего не могут делать никакие другие типы радиоламп. Применяя такие лампы, можно построить генератор, который будет работать не на одной какой-то частоте, как магнетрон, а сможет перестраиваться в широком диапазоне частот.

В основном этими тремя типами ламп и ограничиваются электровакуумные приборы, работающие в диапазоне сверхвысоких частот. Самые короткие волны 0,5—2 *см* не могут усиливаться даже лампами бегущей волны, но они успешно генерируются магнетронами и клистронами. В последнее время создано много новых типов сверхвысокочастотных генераторных и усилительных ламп. Во всех этих лампах используются те же самые методы управления электронным потоком, что и в клистронах, магнетронах и лампах бегущей волны.

Современная радиотехника использует многие сотни различных типов сложнейших электровакуумных приборов. Среди них, кроме обычных радиоламп, электронные стабилизаторы напряжений и токов, газозарядные лампы, электронные коммутаторы-переключатели, фотоэлементы, фотоумножители и многочисленный класс электронно-лучевых трубок.

ЭЛЕКТРОННЫЙ ЛУЧ

Электронно-лучевые трубки — это чудесные приборы, которые помогают «видеть» электрические процессы. Они позволили создать



Электронно-лучевые трубки.

современное телевидение, без них немыслима радиолокация, они находят широкое применение в разнообразнейших приборах — от простейших лабораторных осциллографов до «запоминающих» элементов современных электронных вычислительных машин.

Какие же физические принципы положены в основу работы электронно-лучевых трубок? Само название этого класса приборов подсказывает, что основа их — электронный луч.

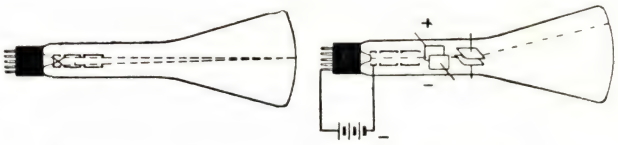
Электронная трубка — это прибор для «рисования» электронным лучом световых рисунков на специальном экране, обладающем способностью светиться в том месте, на которое попадает поток электронов.

Электронно-лучевая трубка мало напоминает трубу. Это большой, обычно стеклянный, иногда металлический конус с почти плоским стеклянным дном, диаметр которого иногда превышает полметра. От вершины конуса отходит цилиндрическая трубка-горловина, заканчивающаяся обычным «радиоламповым» цоколем. Если трубку поставить на цоколь, она будет скорее всего напоминать большую воронку. Она герметически запаяна, воздух из нее выкачан, и на ее широкое дно-экран и изнутри «льются» электроны.

В горловине трубки расположен специальной формы катод, из которого, как и в любой радиолампе, вылетают электроны. Форма катода и другие специальные меры позволяют практически все электроны направлять в сторону экрана. Но, так как они предназначены для «рисования», их нужно собрать в тонкий острый луч и направить в сторону экрана. Эту операцию проделывают электронные линзы, которые так сжимают луч, что диаметр его у экрана не превышает долей миллиметра. Перед фокусировкой, сразу же после вылета из катода, электроны пролетают через кольцевой электрод, который носит название управляющего электрода. Это своего рода радиоламповая сетка.

Чем выше отрицательное напряжение на этой «сетке», тем меньше интенсивность электронного потока, тем меньшее количество электронов и, главное, с меньшей скоростью ударяется об экран трубки. А яркость свечения экрана тем больше, чем сильнее электроны ударяются об экран. Поэтому яркость светящейся точки на экране в том месте, куда попадает луч, будет зависеть от напряжения на управляющем электроде.

Но, конечно, нет смысла делать большой экран и разглядывать на нем одну светящуюся



Фокусировка луча Отклонение луча

точку, даже если она и может менять яркость. Точку нужно перемещать по экрану, тогда она сможет действительно «рисовать» целые изображения. Для этого применяются электростатические или электромагнитные отклоняющие системы. Они отклоняют луч от оси трубки и позволяют послать его в любое место экрана.

Электростатическая система состоит из двух пар пластин, расположенных внутри горловины трубки. Каждая пара пластин отклоняет луч в одной плоскости. Если, например, на вертикальные пластины не подано напряжение, то они, естественно, не окажут никакого воздействия на проходящий между ними поток электронов. Но если на одну из них подать отрицательное напряжение, а на другую — положительное, то первая станет отталкивать электронный луч, а вторая — его притягивать. В результате луч отклонится к положительной пластине и сместится по экрану в соответствующую сторону. Если изменить знаки напряжения, луч отклонится в обратную сторону.

Точно таким же образом горизонтально расположенные пластины будут сдвигать луч по экрану вверх или вниз.

Так же действуют на луч и электромагнитные системы, которые отклоняют электронный луч, воздействуя на него магнитным полем различной напряженности.

Еще говоря о лампах, мы подчеркивали, что электронный поток практически безынерционен. Это значит, что он практически мгновенно следует за изменением напряжения на отклоняющих пластинах. Но уследим ли мы за точкой, если она мгновенно будет перемещаться из конца в конец экрана? Разумеется, нет.

Оказывается, однако, свойства светящегося вещества экрана — люминофора — таковы, что он гаснет не сразу. Как говорят, экраны имеют послесвечение, т. е. продолжают светиться, когда луч уже ушел. Поэтому луч оставляет после себя светящуюся полосу, которая отмечает его путь. Послесвечение в некоторых специальных радиолокационных трубках доводят до нескольких секунд. Обычно луч успевает несколько тысяч раз пробежать по экрану, почти непрерывно «подсвечивая» каждую точку и не давая погаснуть изображению.

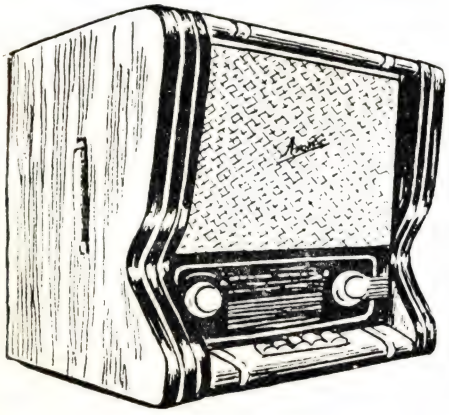
Электронно-лучевые трубки находят самое широкое применение при исследовании различных электрических процессов, так как позволяют видеть «форму» электрического напряжения, «видеть» радиосигналы, изучать быстропеременные процессы, налаживать, настраивать радиоаппаратуру, наблюдая сигнал в любой точке схемы.

Подавая на одну пару пластин излучаемое переменное напряжение, а на другую — специальное напряжение развертки, мы получим исчерпывающую картину колебания. Развертка как бы «разворачивает» электрический колебательный процесс во времени. Луч прочерчивает по экрану кривую, соответствующую форме и частоте поданного переменного напряжения, а так как он безынерционен, то на трубках можно рассматривать колебания очень высоких частот.

Электронно-лучевые трубки непрерывно видоизменяются и совершенствуются, а области их применения еще больше расширяются.

СУПЕРГЕТЕРОДИННЫЙ ПРИЕМ

Приемники, которые стоят в наших комнатах, клубах, которые продаются в магазинах, совсем не похожи на первые «говорящие ящики». Они отличаются от приемников прямого усиления, о которых было рассказано выше, не только техническим совершенством, качеством ламп и отделки, но и принципом работы.



Многие слышали, наверное, что обычный приемник часто называют «супером» или, точнее, супергетеродинным приемником. Чем же он лучше приемника прямого усиления, в чем его преимущества?

Вспомним, что приемник может быть построен без ламп, только с одним детектором. Такие приемники и назывались детекторными. Не производя никакого усиления сигналов, они были, конечно, малочувствительными и принимали только мощные, близко расположенные радиостанции. В приемниках прямого усиления сигнал до детектора усиливается радиолампами, причем усиление ведется на частоте принятого сигнала, усиливается непосредственно сам сигнал.

В супере сигнал до детектора также усиливается с помощью радиоламп, но усиление идет не на частоте сигнала, а на некоторой другой частоте. Эта частота, называемая «промежуточной», остается постоянной на всех частотах настройки и на всех диапазонах работы приемника.

Преобразование колебаний принятого сигнала в колебания промежуточной частоты происходит обычно сразу после антенны, в так называемом преобразовательном каскаде приемника. Пришедший сигнал «смешивается» с сигналом «местного гетеродина», т. е. маломощного передатчика, являющегося частью самой схемы приемника, частота которого близка к частоте сигнала. Получающаяся в результате такого смешения промежуточная частота усиливается и подается на ламповый детектор.

Благодаря тому что в этих приемниках установлен местный генератор — гетеродин, такие конструкции получили название супергетеродинов.

«Супер» означает «сверхприемник», «лучший приемник», так как появление такого метода приема позволило резко увеличить чувствительность радиоприемников, а значит, дальность и качество приема.

В наибольшей мере эти положительные свойства супера сказываются при работе на коротких волнах.

Супер, конечно, значительно сложнее приемников прямого усиления, но его преимущества настолько велики, что для радиовещания приемники прямого усиления в наши дни уже не применяются. Даже самые простые и дешевые, как например известный всем приемник «Москвич», построены по супергетеродинной схеме.

Проследим, по возможности подробнее, путь сигналов от микрофона, установленного в студии, до динамика комнатного приемника.

Играет рояль или звучит гитара, поет ли певец, читает ли диктор — мы слышим звуки. Как и всякие колебания, звуковые волны различаются по амплитуде и частоте — длине волны. Писк комара — один из самых высоких

звуков, которые способно уловить человеческое ухо, — имеет частоту в несколько тысяч герц, а звуки басовых струн рояля колеблются в пределах 25—30 *гц*. Наше ухо способно улавливать звуковые колебания от 16 до 20 тыс. *гц*. (Более подробно о звуковых явлениях можно прочитать в статье «Звук и ультразвук».) Чтобы передать звуки по радио, нужно превратить звуковые колебания в электрические колебания той же частоты, затем «наложить» их на радиоволну и передать в эфир.

Первое звено — это улавливатель и преобразователь звуков — микрофон. Один из типов микрофона устроен следующим образом.

Тонкая алюминиевая пластинка — мембрана — колеблется под действием звуковых волн. Вместе с мембраной колеблется укрепленная на ней легкая катушечка, расположенная в свою очередь между полюсами магнита. Пересечение витками катушки силовых линий магнитного поля, согласно закону электромагнитной индукции, вызывает появление в них электрического тока, причем амплитуда его зависит от силы звука, а частота, разумеется, точно соответствует частоте колебаний катушки и мембраны, т. е. частоте воздействующих на нее звуковых колебаний.

Теперь необходимо эти низкочастотные электрические колебания «наложить» на высокочастотный радиосигнал, излучаемый антеннами. Такой процесс «окраски» радиоволн называется модуляцией.

Осуществить какие-либо изменения высокочастотного сигнала, которые соответствовали бы колебаниям низкой частоты, можно различными способами, воздействуя, например, на амплитуду или на частоту радиосигнала.

Амплитудная модуляция широко используется в радиовещании. Низкочастотные колебания после предварительного усиления поступают из микрофона в специальное устройство — модулятор. Здесь они и воздействуют на амплитуду высокочастотных колебаний, изменяя ее в такт с низкочастотными.

Промодулированный высокочастотный сигнал, несущий на себе «окрашивающий» его звуковой сигнал, усиливается и подводится к антенне передающей радиостанции и излучается в пространство в виде высокочастотной электромагнитной волны.

Пройдя многие километры, электромагнитное поле достигнет антенны, протянутой над вашей крышей или просто под потолком комнаты.

Антенна — это своего рода колебательный контур с очень широкой полосой пропускания. Электромагнитное поле любой волны радиовещательного диапазона возбудит в ней токи высокой частоты.

Что же происходит дальше?

Каждый умеет настраивать приемник, но не многие отчетливо представляют себе, что происходит при вращении ручек.

Возьмем, к примеру, приемник типа «Москвич» (рис. на стр. 482). Всего две ручки выведены на его переднюю панель: левая — включатель и регулятор громкости, правая — настройка. Повернем левую ручку. Легкий щелчок подтвердит, что мы включили приемник, но первые мгновения он мертв — никаких звуков не слышно. Это объясняется тем, что нужно время для подогрева катодов ламп. Но вот катоды нагрелись докрасна, началась эмиссия электронов, и из динамика послышался характерный шум: лампы готовы усиливать сигналы.

Теперь можно настраивать приемник — «искать» станции. Начнем вращать правую ручку — ручку настройки. Вместе с ней начнет вращаться стрелка на шкале приемника, показывая своим концом, на какую длину волны настроен приемник. Но, конечно, не стрелка определяет настройку: ручка настройки вращает ось блока переменных конденсаторов — меняется емкость, меняется частота настройки резонансных контуров.

Блок переменных конденсаторов представляет собой связанные общей осью два конденсатора. Каждый из них состоит из тонких алюминиевых пластин особой формы, разделенных воздушным промежутком. Часть пластин конденсатора укреплена на оси и может поворачиваться, выдвигаясь из неподвижных пластин.

Подвижные пластины соединены вместе и образуют как бы одну общую пластину — ротор. Другую пластину — статор — образуют также соединенные вместе неподвижные пластины.

Если пластины ротора совсем выдвинуть из пластин статора, то емкости у конденсатора

практически не будет, так как не будет и самого конденсатора — останется только одна пластина! Если же пластины ротора полностью вдвинуть между пластинами статора, емкость будет максимальной. Промежуточные положения ротора позволяют получить любую величину емкости и тем самым настраивать на любую частоту контур, в который входит эта емкость.

Почему же в нашем приемнике два переменных конденсатора, а роторы их сидят на одной оси? Дело в том, что «Москвич» — супергетеродинный приемник. Сигнал, пришедший из антенны, выделяется на входном резонансном контуре, в который входит один переменный конденсатор, и смешивается в первой лампе с сигналом гетеродина, резонансный контур которого перестраивается вторым конденсатором. А для того, чтобы частота гетеродина всегда отличалась от частоты сигнала на промежуточную частоту, конденсаторы посажены на общую ось. Тогда, изменяя частоту настройки входного контура, мы будем изменять и настройку гетеродина, причем разность частот всегда будет равна промежуточной.

Итак, вращая ручку настройки, мы вращаем роторы переменных конденсаторов и меняем настройку входного контура и гетеродинного. Когда частота станции совпадет с частотой настройки входного контура, он выделит эту частоту. С контура высокая частота радиосигнала поступит на одну из сеток первой смесительной лампы, а на другую — «привязанный» к частоте входного контура сигнал гетеродина.

После взаимодействия в электронном потоке («смешения») в контуре, включенном в анодную цепь, выделится промежуточная частота, на которую настроены все избирательные контуры усилителя промежуточной частоты, который и обеспечивает усиление сигнала для подачи его на детектор. Контуры промежуточной частоты не перестраиваются; частота их настройки все время постоянна.

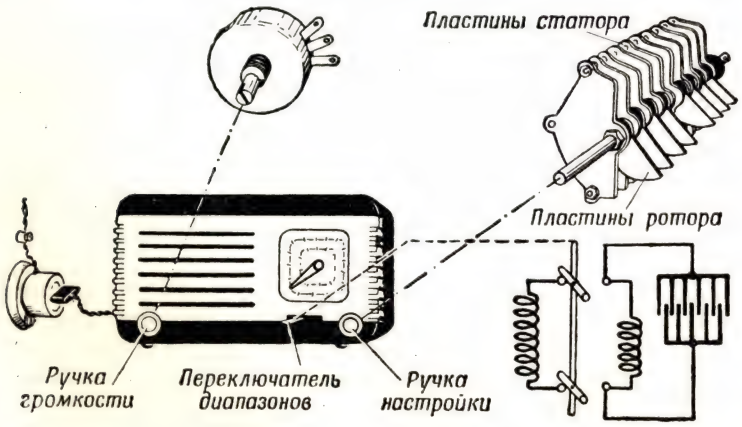
Очень важно отметить, что модуляция не нарушается при преобразовании высокочастотного сигнала в промежуточный, и, хотя на детектор поступает «не очень высокочастотный» сигнал (обычно 465 *кгц*), он «раскрашен» точно так же, как и пришедший в антенну.

Выделение из модулированных колебаний электрических колебаний низкой звуковой частоты производит уже знакомый нам ламповый детектор. Он «обнаруживает» колебания промежуточной частоты и детектирует их, причем выпрямленный ток будет постоянным, если постоянна амплитуда радиосигнала, или, оставаясь выпрямленным, будет меняться со звуковой частотой, если радиосигнал промодулирован. Детектирование, как мы уже говорили,— процесс, обратный модуляции. С детектора снимаются точно такие же электрические колебания звуковой частоты, какие были сняты с микрофона. Поэтому после усиления их сразу подают на динамик. Происходит то же, что в микрофоне, но в обратном порядке: токи звуковой частоты, взаимодействуя с полем магнита, вызывают колебания катушки и связанного с ней рупора — диффузора. Колеблется окружающий воздух, и звуковая волна достигает наших ушей.

Громкость звучания регулируется левой ручкой — ручкой громкости. На ее оси расположен уже упомянутый выключатель и переменное сопротивление, меняя величину которого, мы меняем амплитуду напряжения в усилителе низкой частоты, а следовательно, и громкость.

Под самой шкалой расположена еще одна ручка, которую нельзя вращать, но можно передвигать вправо или влево. Это переключатель диапазонов. В этом приемнике их два: правое положение ручки соответствует длинноволновому, левое — средневолновому диапазону.

При повороте ручки перемещаются связанные с ней контакты и подключаются к переменным конденсаторам другие катушки, с другим числом витков. Теперь, при той же емкости, контуры будут уже настроены на другие час-



Что мы делаем, настраивая приемник.

тоты и вращение ручки настройки будет изменять настройку контуров в другом диапазоне частот.

Современные приемники высших классов имеют 5—6 диапазонов, регулировку тембра, ширины полосы и т. д. Кроме того, их схемы включают в себя многочисленные автоматические регулировки. Но основа настройки приемника — контуры и блок переменных конденсаторов.

РАДИОТЕЛЕГРАФ И РАДИОРЕЛЕЙНЫЕ ЛИНИИ

24 марта 1896 г. на расстояние в 250 *м* была передана первая в мире радиограмма в два слова — «Генрих Герц». Это было первое телеграфное сообщение, переданное по радио с помощью азбуки Морзе. Больше 20 лет радиоволны переносили только телеграфные точки и тире. Но и с появлением радиотелефонной связи, т. е. возможности передавать непосредственно речь и музыку, радиотелеграф не потерял своего значения. По-прежнему велика его роль и в наши дни.

Телеграфная передача надежнее радиотелефонной, меньше боится помех и способна обеспечить связь на любых (земных) расстояниях. Конечно, современные радиотелеграфные аппараты мало похожи на старинные, в которых сигнал модулировался, т. е. прерывался на короткие и длинные отрезки — на точки и тире, знаменитым «телеграфным ключом», а прием шел на слух. Постепенно ручные «ключи» сменились автоматическими — трансмиттерами, а вместо наушников и карандаша телеграфиста появился ондулятор — прибор для приема и записи телеграфных знаков. Это позволило резко увеличить скорость передачи — до 400—500 слов в минуту и сократить ошибки и искажения.

Но еще быстрее стали передаваться радиограммы после изобретения фототрансмиттера. Фотоэлемент считывает с бумажной ленты точки и тире и преобразовывает их в электрические сигналы разной длительности. Они-то и модулируют затем радиоволну передатчика.

Современные аппараты дают возможность печатать текст с помощью клавиш, как на пишущей машинке, а прием ведут самостоятельно, без помощи человека. Буквопечатающий аппарат принимает сигналы и печатает их сразу в виде букв на телеграфную ленту.

Наша отечественная радиотелеграфия достигла высокого уровня и позволяет вести уверенную передачу до 1000 слов в минуту.

В настоящее время радиотелеграфная связь обеспечивается специальными магистральными приемниками. В нашей стране на основных линиях связи используются и радио и провода. В случае надобности они заменяют и дополняют друг друга.

При помощи радио передают не только буквы, речь и музыку, но и фотоснимки, чертежи, копии документов. Большую фотографию, размером со страницу школьной тетради, можно передать из Москвы в Америку за 10 мин.

В современных телефонно-телеграфных линиях связи широко применяют усилители на радиолампах. Дело здесь вот в чем. Линия Москва — Хабаровск, например, имеет протяженность 7—8 тыс. *км*. Пройдя такой путь, сигналы сильно ослабевают. Поэтому в некоторых промежуточных пунктах приходится ставить усилители.

Советские ученые создали систему передачи сообщений с помощью высокочастотных колебаний — так называемый ВЧ (высокочастотный) телефон. По проводам передаются не обычные телефонные токи низкой — звуковой — частоты, а колебания высокой частоты — радиочастоты, промодулированные (как и в радиопередаче) низкими, звуковыми, частотами. Так же как в эфире, радиоволны различной длины не смешиваются между собой и успешно выделяются приемником. Для этого на приемном конце линии ставят специальные узкополосные фильтры; каждый из них пропускает только те частоты, которые предназначены для одного какого-либо телефона, или, как говорят инженеры, для одного «канала». В дальнейшем сигналы преобразуются, как и в приемнике: они усиливаются, детектируются, и токи звуковой частоты поступают в телефон.

Такая система передачи позволяет по одному кабелю сразу передавать больше тысячи телефонных разговоров и несколько программ телевидения. Легко себе представить, сколько проводов пришлось бы тянуть между городами при современной потребности в связи, если бы радио не снабдило проводную технику новыми средствами.

Применение для этой цели ультракоротких волн позволяет еще сильнее «уплотнять» линии и использовать те же методы и ту же аппаратуру в беспроводной радиосвязи — для так называемых радиорелейных или ретрансляционных линий.

Радиорелейная линия представляет собой цепочку приемно-передающих УКВ радиостан-

ций. Так как ультракороткие волны распространяются, как правило, только в пределах прямой видимости, то такие станции располагаются на расстоянии 50—60 *км* одна от другой, а в горах — на 120—150 *км*. Антенна каждой промежуточной станции «смотрит» точно в сторону следующей и посылает узким лучом радиоволны. Приняв сигналы предыдущей, каждая следующая станция усиливает их и передает дальше. Аппаратура таких промежуточных станций достаточно проста, мощность передатчиков небольшая, так как вся энергия радиоволны передается только одному адресату, а не излучается, как в радио и телевизионных передающих станциях, во все стороны. Направленная передача, малые длины волн, сложные виды модуляции — все это полностью устраняет действие атмосферных и всяких иных помех.

Радиорелейные линии позволяют охватывать огромные территории. Особенно ценно то, что по таким линиям можно вести многоканальную связь — уплотняя линию, передавать сразу несколько программ телевидения, радиовещания и тысячи телефонных разговоров.

В нашей стране ведется широкое строительство этих линий.

Недалеко то время, когда программу московского телецентра будут смотреть не только в Ленинграде, но и Киеве, Львове, Баку, Ереване, Горьком и многих других далеких и близких городах Европейской части СССР.

Но радиорелейные линии — это еще не последнее слово в технике распространения ультракоротких волн на большие расстояния.

НОВЫЕ ВИДЫ РАДИОСВЯЗИ

Еще в конце второй мировой войны операторы морских радиолокационных станций часто наблюдали изображения берегов, удаленных от них на сотни и тысячи километров. Затем, в послевоенные годы, когда телевидение стало бурно развиваться, все чаще начали поступать сообщения о приеме телевизионных изображений на больших расстояниях.

Ученые разгадали причины этих явлений и научились их использовать. Оказалось, что ультракороткие волны от 10 до 5 *м*, на которых как раз и работают телевизионные передатчики и часть радиолокационных станций, обладают свойством так называемого диффузного, рассеянного, распространения.

Дело в том, что в ионосфере, а также в стратосфере плотность и степень электрической заряженности ее газов не одинакова. Такие неоднородности возникают от разных причин. Их вызывают непрерывно сгорающие метеоры, северные сияния, различная интенсивность ультрафиолетовых лучей и т. п.

В результате этих неоднородностей радиоволны метрового диапазона рассеиваются подобно тому, как капельки тумана рассеивают луч автомобильной фары.

Если послать с помощью направленной антенны узкий пучок радиоволн под небольшим углом к горизонту, то радиоволны не просто искривятся, как в коротковолновом радиовещательном диапазоне, а частично пройдут насквозь, частично рассеются во все стороны. Направив туда антенну приемной станции, можно уловить часть рассеянной энергии.

Диффузная радиосвязь надежна, не боится помех, но имеет и недостатки. Так, для нее нужны мощные передатчики, чувствительные приемники и антенны большой направленности.

Нельзя, например, при ней уверенно поддерживать связь ближе чем на 1000 *км*. Ближе, а не дальше! Дело в том, что если направить антенну под бо́льшим углом к горизонту, то почти вся энергия пройдет сквозь ионизированный слой, и рассеивания не произойдет.

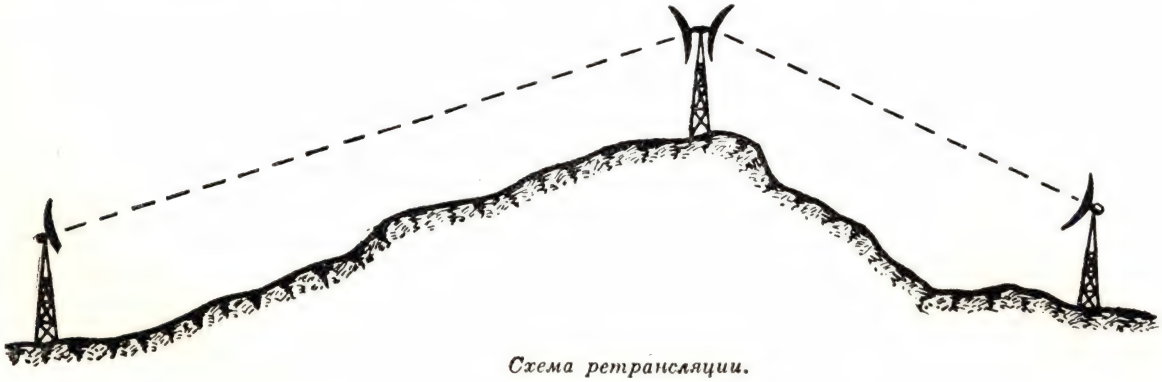
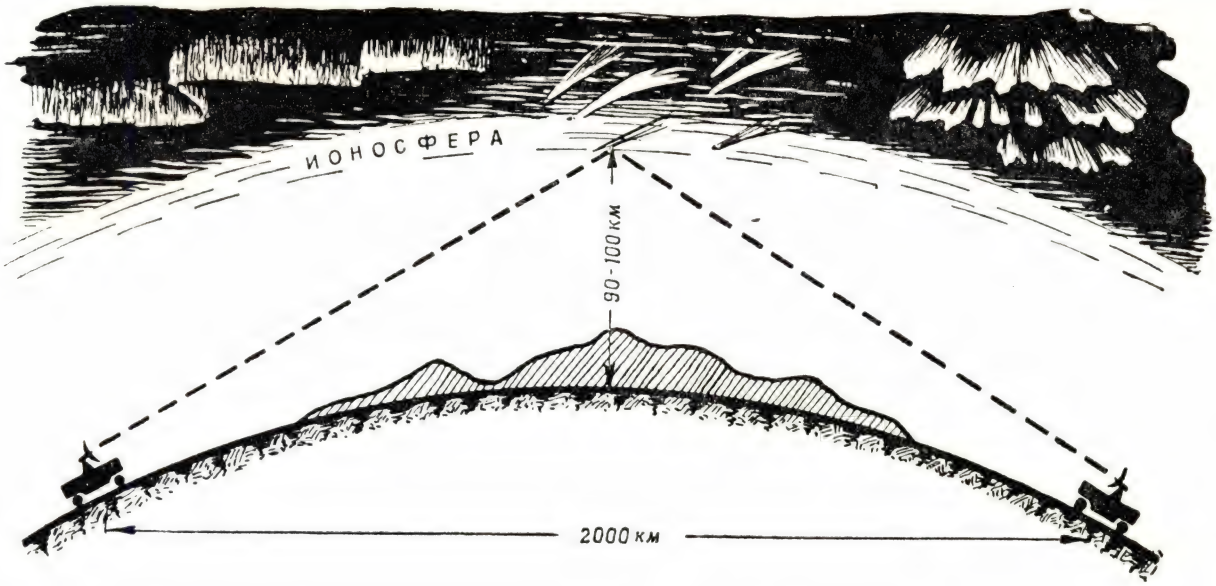


Схема ретрансляции.



Существует и другая разновидность диффузного распространения радиоволн — тропосферное рассеяние. Оно происходит в слоях, расположенных значительно ниже. В зависимости от состояния погоды, и особенно часто над морем, возникают так называемые воздушные радиоволноводы. Это своеобразные каналы, по которым ультракороткие волны могут распространяться, не затухая, на расстояния до 1000 *км*. Причем по таким волноводам свободно путешествуют и волны длиной от нескольких метров до нескольких сантиметров. Именно благодаря этому явлению 10-сантиметровая военная радиолокационная станция, установленная в Индии в районе Бомбея, «видела» за 2000 *км* берега Аравийского полуострова еще в 1940—1945 гг.

Известно, что каждый день в атмосфере нашей планеты сгорает 5—10 млн. метеоров. Даже самые крошечные из них оставляют при этом за собой «хвост» ионизированных газов. След метеора величиной с булавочную головку имеет длину до 10 *км* и держится несколько секунд. Волны метрового диапазона хорошо отражаются от такого ионизированного столба. Поэтому, направив антенну туда, где сгорают «падающие звезды», мы сможем пользоваться их хвостами как антеннами ретрансляционных станций.

Так работает построенная в Канаде система станций для дальней телеграфной связи, названная «Жаннет». Разделенные расстоянием в 1500 *км*, приемная и передающая станции направляют свои антенны в точку, расположенную на высоте 90 *км* над Землей и находящуюся примерно посредине между станциями. Именно на этой высоте сгорают метеоры. Станция «ждет» появления ионизированного хвоста. Как только загорится метеор, она автоматически начинает передавать телеграмму со скоростью 2000 слов в минуту. Приемная станция также должна спешить и быстро записать сигналы — ведь передача автоматически кончается через несколько секунд, когда «хвост потухнет».

Такая связь «на хвостах падающих звезд» имеет очень много преимуществ. Ей не страшны атмосферные помехи и различные ионосферные возмущения, особенно сильные в зоне полярных сияний. Скорость передачи сообщений всегда очень большая, так как метеоров более чем достаточно. Мощность передатчиков нужна весьма малая, потому что столб ионизированных газов хорошо отражает радиоволны.

Опыты по изучению и применению новых видов радиосвязи начались совсем недавно — 10—12 лет назад. Но уже достигнуты замечательные успехи, которые позволяют реально представить себе радиосвязь ближайшего будущего. Не только телеграммы, но и изображение можно будет передавать на сколь угодно большие расстояния.

В нашей стране с ее огромными расстояниями новые методы особенно перспективны. Вместо десятков радиорелейных ретрансляционных станций появится лишь несколько мощных

передатчиков с направленными антеннами. Располагаясь на расстоянии в 1,5—2 тыс. *км* друг от друга, они за 5—6 скачков перенесут телевизионную программу из Москвы во Владивосток. Новые виды ультракоротковолновой связи и разветвленная сеть радиорелейных линий позволят связаться с самыми отдаленными уголками нашей Родины.

РАДИОЭЛЕКТРОНИКА

Наш век все чаще называют атомным. Но не менее правильным было бы назвать его веком радиоэлектроники. Точнее, наше время нужно назвать началом эпохи радиоэлектроники. Эта область научного знания сейчас чрезвычайно быстро развивается, границы ее применения беспрерывно расширяются, она порождает новые открытия и проникает буквально во все отрасли науки, техники, народного хозяйства, быта.

Радиоэлектронная промышленность занимает значительное место в общем производстве любой технически развитой страны. Во многих странах выпускаются миллионы электронных ламп и других электровакуумных приборов. Разнообразные способы их применения и составляют предмет электроники.

Но, родившись вместе с радио и для радио, радиолампы не могут существовать без радиосхем и элементов, так же как современная радиотехника немыслима без ламп, электронных трубок и фотоэлементов. В наши дни радиотехника и электроника настолько тесно переплетаются, что невозможно провести между ними границу. Поэтому теперь эти области техники объединяет одно название — р а д и о э л е к т р о н и к а.

Радиолокация, радионавигация, радиоастрономия, радиоспектроскопия и т. д., зародившись из радиотехники и электроники, выросли в самостоятельные области науки и техники. Но все они, как бы подчеркивая свое происхождение, сохранили в начале названий слово «радио».

Пожалуй, только телевидение не имеет в названии такого «радиоклейма». Но телевизор, по сути дела,— сложный радиоприемник, вернее, два радиоприемника, один из которых принимает (как и обычные приемники) звуковое сопровождение телепередач, а другой — сигналы изображения, которое воспроизводится на экране кинескопа. Телевизионные сигналы звука и изображения передаются с помощью ультракоротких волн метрового диапазона. Как правило, это волны длиной 5—7,5 *м*.

Почему же для телевизионных передач выбран именно диапазон УКВ? Дело в том, что если для передачи речи и музыки радиовещательным станциям требуется полоса в 10 *кгц*, то для передачи движущегося изображения нужна полоса в 5—6 тыс. *кгц*. Это значит, что одна телевизионная передача заняла бы полосу, в которой могли бы работать 500—600 радиовещательных станций! Поэтому пришлось использовать просторный ультракоротковолновый диапазон, свободный к тому же от атмосферных и взаимных помех.

Но, как мы уже знаем, распространение волн этого диапазона ограничено горизонтом. И только последние достижения в этой области, такие, как радиорелейные линии и диффузное распространение, позволяют передавать телевизионные программы на большие расстояния. Есть и другие способы передачи широкополосных телевизионных программ: один из них — применение специального, так называемого к о а к с и а л ь н о г о, кабеля. Именно так из Москвы в Калинин регулярно передается программа московского телецентра.

Высокий уровень современной техники позволяет проектировать волноводные линии для междугородной передачи. Металлические трубы прямоугольного сечения протянутся на сотни километров, а внутри них, почти не ослабляясь, со скоростью света помчатся радиоволны. Перед советскими радиоконструкторами стоит задача в ближайшие годы разработать комплекс аппаратуры для обслуживания таких волноводных междугородных линий и приступить к их созданию.

Все описанные здесь способы найдут самое широкое применение, тем более, что в ближайший год-два вступят в строй станции цветного телевидения, для которых нужны еще более

широкие полосы. Первый цветной телецентр создается в Москве, причем его передачи будут обладать полной совместимостью с обычной системой черно-белого телевидения. Это означает, что передачи цветного телецентра будут приниматься обычными телевизорами, а цветные телеприемники будут в свою очередь принимать черно-белые программы, но, разумеется, без цветной окраски.

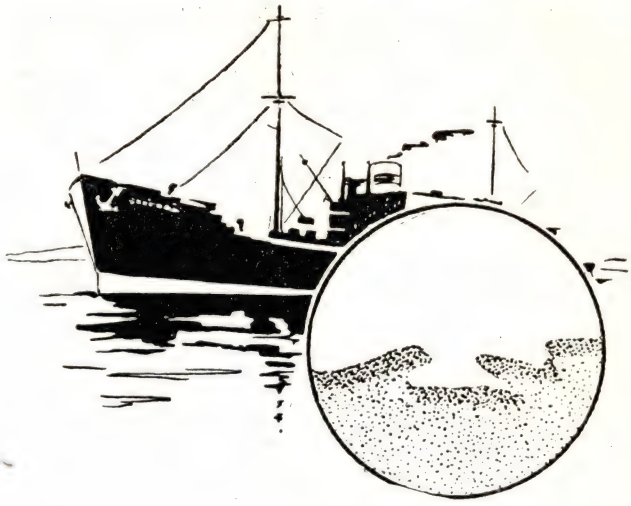
Телевидение использует радиоволны для перенесения изображений и широкополосные радиоприемники для их приема, но основа телевизора — электронно-лучевая трубка — творение электроники.

В 1907 г. русский ученый проф. Б. Л. Розинг впервые предложил использовать электронно-лучевую трубку для получения изображения. С тех пор сильно изменились и неизмеримо совершеннее стали специально изготавливаемые для телевизоров трубки-кинескопы, но принцип их работы остался тот же. Электронный луч строчка за строчкой пробегает весь экран и создает светящийся прямоугольник — растр. Если теперь на управляющий электрод (на сетку) подать модулированный, т. е. «раскрашенный», сигнал, яркость луча будет меняться, каждая точка каждой строки будет светиться в соответствии с пришедшим сигналом, и на экране возникнет изображение. Оно будет точно соответствовать той картине в студии, на которую направлена передающая камера. Луч в этой камере также по строкам «прочитал» передаваемую сцену, затем модулятор в соответствии с прочитанным промодулировал («разрисовал») сигнал, а передатчик излучил его в эфир.

Электронно-лучевая трубка играет значительную роль и в другой важнейшей области науки наших дней — радиолокации. Ее задача — определять с помощью радиоволн место различных объектов на воде, в воздухе и на суше.

Какую же помощь могут оказать здесь радиоволны?

Прежде всего в локации применяются ультракороткие волны дециметрового и сантиметрового диапазонов. Как мы уже знаем, их можно излучать узкими пучками с помощью направленных антенн. Как и все электромагнитные колебания, распространяются эти волны с постоянной скоростью — скоростью света. Так как УКВ намного короче крупных объектов — самолетов и кораблей, то они не огибают их, как длинные волны, а отражаются, вернее переизлучаются, этими объектами во все стороны. Эти-то свойства УКВ и позволили создать радиолокацию.



Корабельный локатор «видит» море и гавань.

Передатчик локатора излучает радиоволны короткими импульсами — как бы порциями, разделенными большими интервалами. Очень часто длительность работы, длительность импульса в 1000 раз меньше времени паузы. Излучив такой импульс, локатор ждет ответа, его антенна переключается с передачи на прием. Если в том направлении, куда послана короткая порция радиоволн, есть какой-либо предмет, радиоволны отразятся от него и какая-то часть их вернется обратно, к месту посылки. Отраженный импульс принимается чувствительным приемником, усиливается и подается на электронно-лучевую трубку. Здесь он будет виден как светящийся столбик или точка. В момент излучения сигнала на трубку подается зондирующий импульс. Но отраженный эхо-импульс не совпадает с ним, так как приходит на трубку позже, затратив на путешествие до цели и обратно какое-то время. Измерив это время и зная скорость распространения радиоволн, можно точно вычислить расстояние до объекта, а зная, куда нацелен луч антенны,— и его местонахождение.

Если цель будет двигаться, эхо-импульс тоже будет перемещаться по экрану, отодвигаясь или придвигаясь к неподвижно стоящему зондирующему импульсу. Так, локатор «видит» цель, позволяет определить направление и расстояние до нее. И все это — в любую погоду, в любое время дня и ночи!

Родившись перед второй мировой войной, радиолокация бурно развивается. Наиболее широко применяется она в военных целях. Современные станции дальнего обнаружения «видят» высоко летящий самолет за 300—500 и даже 1000 *км*. Станции сами совершают круговой обзор местности, и тогда на экране можно видеть все цели вокруг. С самолета локатор «осматривает» землю, и на его экране вырисовывается «живая» карта местности. Орудие ведет огонь, а на экране видно, как вокруг цели падают снаряды — недолет или перелет. Локатор может следить за целью, может даже наводить на нее управляемый снаряд. Локатор размещают в головках артиллерийских снарядов и ракет, и он взрывает их на заданном расстоянии от цели.

Широкое применение локация находит в мирной жизни, в народном хозяйстве. Локатор незаменим на корабле, самолете, в оборудовании аэродромов и портов. Его начинают устанавливать на автомобилях, на перекрестках улиц...

Развитие радиолокации шло по пути применения все более коротких волн. Это потребовало создания генераторов ультравысоких частот, остро направленных антенн и развития импульсной техники. Достижения и технические возможности, которые открылись благодаря применению радиолокационных методов в астрономии, геодезии, навигации, спектроскопии, метеорологии, в электронных счетных машинах и в других областях, привели к зарождению новых самостоятельных отраслей науки, основанных на радиометодах.

Локатор «видит» цель.

Одна из таких наук, целиком обязанная своим появлением радиолокации,— радиоспектроскопия — новая область радиофизики. Созданные для целей радиолокации клистронные генераторы сверхвысоких частот оказались единственными источниками высокочастотных колебаний, годными для спектроскопии. Основой радиоспектроскопии является радиотехнический метод резонансного поглощения радиоволн. Молекулы каждого вещества, находящегося в жидком, газообразном или твердом состоянии, представляют собой колебательную систему с собственной частотой резонанса. Частоты эти для большинства веществ лежат в области сверхвысоких частот, в диапазоне сантиметровых и миллиметровых волн. Если поместить вещество в электромагнитное поле соответствующей частоты, то именно при частоте резонанса каждый контур — молекула — начнет в такт колебаниям «отсасывать» энергию из поля.

Меняя частоту около резонансной и измеряя величину поглощения, можно подробно исследовать вещество, проникать внутрь его структуры, изучать его свойства.

При помощи методов радиоспектроскопии было впервые обнаружено радиоизлучение межзвездного водорода на волне 21 *см*, были созданы молекулярные часы с абсолютно точным ходом, изучено большое количество химических соединений, проводится быстрый качественный и количественный анализ смесей газов, создаются молекулярные генераторы и усилители, осваиваются генераторы все более высоких частот — вплоть до долей миллиметра. Последнее позволит перейти от локации к прямому ви́дению при помощи радиоволн.

Многим обязана радиолокации и радиоастрономия. Операторы военных локаторов, обшаривая горизонт в поисках вражеских самолетов, первыми обнаружили радиоизлучение Солнца, которое воспринималось как мощные помехи. Вскоре выяснилось, что из многих участков неба идут неведомые радиоволны различной длины. Подробное их изучение открыло новые возможности для проникновения в тайны Вселенной.

С помощью антенн радиотелескопов были открыты так называемые радиозвезды и изучены космические тела и туманности, вовсе не излучающие видимого света. Подробно изучена корона Солнца, так как локаторы дали возможность изучать ее регулярно, а не только во время полных солнечных затмений (1—2 часа в столетие!). То же относится к изучению метеоров, хвосты которых можно было наблюдать только ночью и в ясную погоду. А радиоизлучения межзвездного газа дают такие сведения о Вселенной, каких оптическая астрономия дать вообще не в состоянии.

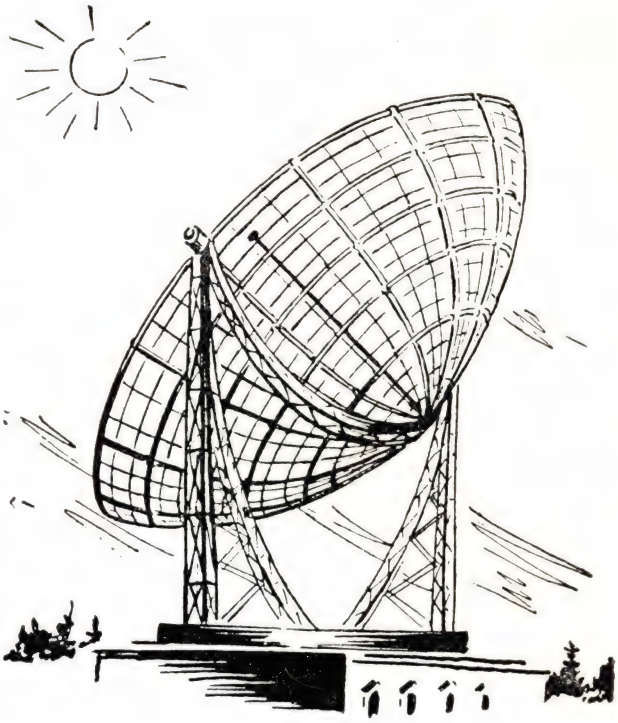
Новые задачи встали перед радиоастрономией после запуска первых искусственных спутников Земли. Радиоастрономические телескопы, как правило, только принимают радиоизлучения, но с появлением в Космосе первых искусственных спутников Земли возникла необходимость в радиотелескопах-локаторах. Они были построены и успешно ведут наблюдения за спутниками, облучая их радиоимпульсами и принимая отраженные эхо-сигналы.

Помимо решения чисто астрономических задач, радиоастрономия дает в руки ученых новое средство изучения земной атмосферы и происходящих в ней физических процессов.

Радиоастрономия — очень молодая наука, но она быстро развивается и ее значение в изучении Вселенной все возрастает. Очень много сделали для ее развития советские ученые В. А. Гинзбург и И. С. Шкловский.

Радиоэлектроника обогатила и древнюю науку о вождении кораблей по морям и океанам — навигацию. В основу радионавигации положена возможность создания направленных антенн и определения направления приема радиоволн. Для навигации можно использовать радиостанции любого диапазона, и даже радиовещательные. Но обширную сеть морских и авиатрасс, как правило, обслуживают специальные радиомаяки, по которым штурман уверенно определяет свое местоположение и курс. Современные навигационные системы позволяют даже при отсутствии автопилота вести самолет без помощи летчика.

Радиоэлектроника стала основой для создания современных быстродействующих электронных вычислительных машин. Основные их узлы — арифметические устройства — строятся на электронных лампах или полупроводниковых приборах; в системах «памяти» применяются радиолампoвые триггерные ячейки и электронно-лучевые трубки. А, как известно, электронные машины применяются не только



Радиотелескоп.

для трудоемких математических вычислений, но и для управления в различных автоматических системах.

Современная автоматика и телемеханика в значительной степени базируются на достижениях радиоэлектроники. Целые энергосистемы линий электропередач и электростанции управляются на расстоянии с помощью радиосигналов; создаются автоматизированные линии и даже заводы, где «думающие машины» контролируют, регистрируют и направляют различные процессы производства.

Радио и радиоэлектроника широко проникли в медицину. Возникла новая отрасль медицины — радиотерапия, использующая свойства ультракоротких волн проникать сквозь ткани тела и воздействовать на них. Создана разнообразная аппаратура для радиодиагностики — распознавания болезней с помощью радиоволн.

Специальные радиоусилители позволяют оглохшим вновь хорошо слышать. А для слепых созданы светолокаторы, с помощью которых они могут «видеть» окружающие предметы.

Применение радиоэлектроники поистине безгранично. Электронные микроскопы позволили проникнуть в глубины микромира,

недоступные обычным оптическим микроскопам. Высокочастотный нагрев дает возможность плавить металлы, производить поверхностную закалку деталей и ускорять процессы сушки. При помощи поля высокой частоты можно передавать энергию на расстояние и строить ВЧ-мобили — транспорт, который будет получать энергию «по радио». Ультравысокими частотами убивают сельскохозяйственных вредителей и ускоряют рост растений. Электролокаторы могут находить повреждения в подземных кабелях. Радиоуправляемые и самонаводящиеся ракеты стоят на вооружении армий. Полупроводниковые солнечные батареи летают в Космосе на третьем советском спутнике Земли и автоматической межпланетной станции.

Дальнейшее развитие радиоэлектроники обещает фантастические технические усовершенствования и, безусловно, поможет воплотить в жизнь самые дерзновенные мечты человечества.

ПОЛУПРОВОДНИКИ

Полупроводники... Кто не слышал об этих замечательных материалах? О них пишут в газетах и журналах, их показывают в кино и по телевидению, о них вспоминают в радиопередачах. Что ж, полупроводники заслужили такой почет. Серо-голубые, тускло блестящие кристаллы германия, кремния, селена, бесчисленные сплавы, окислы привлекают пристальное внимание ученых. Над полупроводниками трудятся химики и металлурги, их изучают радиоинженеры, конструкторы автоматических устройств, на них возлагают надежды светотехники, энергетики, врачи; даже физиологи все чаще и чаще говорят о них. Будущее науки и практики рисуется тесно связанным с этими веществами, носящими столь скромное имя.

Что же такое полупроводники? Почему они стали так нужны человеку?

В поисках ответов на эти вопросы мы сначала вкратце разберемся в физической сущности явления электропроводности.

ПРОВОДНИКИ И ИЗОЛЯТОРЫ

Читателю отлично знакомы два основных материала электротехники — проводник и изолятор. Медная проволока хорошо проводит электрический ток. Поэтому медь, как и другие металлы, называют проводником. А фарфоровый ролик или какой-нибудь предмет из стекла, резины, эбонита тока не пропускают. Это изоляторы. В чем физические причины различия проводников и изоляторов?

Вы, конечно, знаете, что любое вещество построено из бесчисленных мириад атомов. Всякий атом состоит из ядра, вокруг которого кружится хоровод электронов — легких частичек, несущих отрицательный заряд. И оказывается, что в проводниках и изоляторах наружные, так называемые валентные, электроны атомов, те самые, что создают химические связи, ведут себя неодинаково.

В металле атомы лишены валентных электронов. Эти электроны там не могут держаться на атомах, соскакивают с них и свободно блуждают внутри металла, образуя своеобразный электронный газ. Частицы его, правда, не могут уйти из металла. Общие усилия положительно заряженных атомов (ионов), образующих остов (кристаллическую решетку) металла, надежно удерживают электронный газ внутри металлического предмета [1]. Можно считать, что валентные электроны там «обобществлены», принадлежат сразу всем атомам вместе, а не каждому из них в отдельности. Это и определяет высокую электропроводность металлов (рис. 1, сверху).

Стоит прижать металлическую проволочку к полюсам электрической батареи, как частички электронного газа подхватываются электрическим полем и устремляются к положительному полюсу. По металлу начинает течь электрический ток.

Из школьных опытов читатель, вероятно, помнит, что при нагревании проводника его электропроводность падает. Поэтому спираль электрической плитки сразу после включения в сеть обладает значительно меньшим сопротивлением, чем когда докрасна раскалится.

[1] Лишь при сильном нагревании частички электронного газа начинают двигаться настолько быстро, что обретают способность вырываться прочь из металла. Происходит, как говорят физики, термоэлектронная эмиссия.

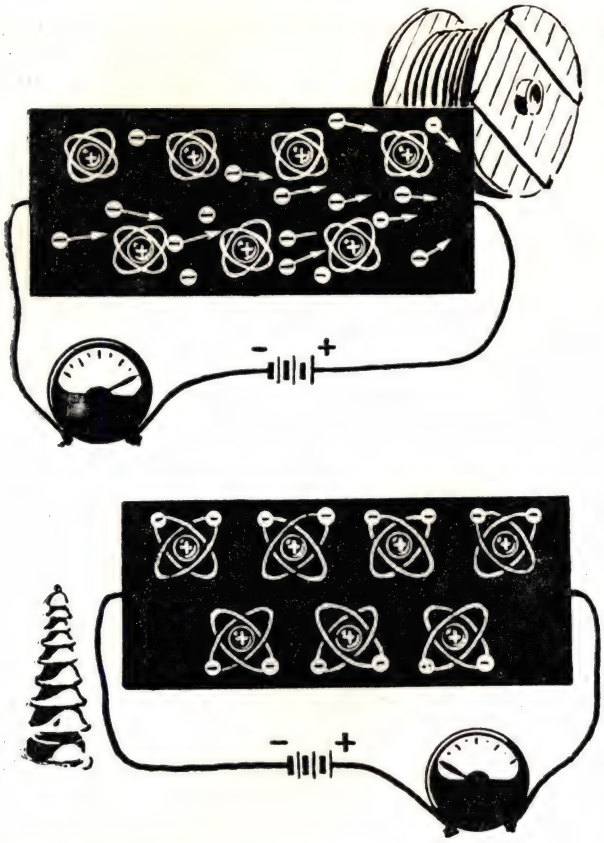


Рис. 1. Верхний рисунок дает представление об электропроводности металла. Валентные электроны не связаны с каждым атомом в отдельности, а движутся между ними. Эти электроны способны переносить электрический ток. На нижнем рисунке показано, как можно представить себе структуру изолятора. Валентные электроны там прочно держатся на атомах. Поэтому в изоляторе нечему переносить электрический ток.

В этом важный физический признак проводников. Как его можно объяснить?

Вы уже знаете, что электронный поток в металле пробивается через кристаллическую решетку атомов, лишенных валентных электронов. Но ведь атомы не стоят неподвижно. Они колеблются. Чем выше температура, тем сильнее колебания решетки и, следовательно, тем труднее пробиваться сквозь нее электронному потоку. Такова в самых кратких чертах и очень упрощенно показанная физическая сущность электропроводности металлов.

А что происходит в изоляторах?

В фарфоровом ролике, как и в любом другом изоляторе, дело обстоит иначе. Электронного газа там нет, атомы крепко удерживают свои валентные электроны (рис. 1, внизу). В изоляторе нечему переносить ток. Правда, если очень сильно разогреть изолятор, его иногда все же можно сделать электропроводным: при интенсивном тепловом движении атомы станут терять валентные электроны, которые и послужат носителями тока.

Полупроводники же занимают промежуточное положение между проводниками и изоляторами.

ЭЛЕКТРОНЫ В ПОЛУПРОВОДНИКЕ

При низкой температуре большинство электронов в полупроводниках «сидит» на своих местах в атомах. Но связаны они с атомами не слишком сильно. Участвуя в тепловом движении, атомы раскачиваются и теряют наружные электроны. Вы нагреваете полупроводник и увеличиваете в нем количество электронного газа, т. е. свободных электронов, способных переносить электрический ток.

Значит, полупроводник при нагревании не уменьшает, как металл, а, наоборот, увеличивает свою электропроводность (рис. 2). В этом заключается важный физический признак любого полупроводникового материала.

Характерна и другая особенность. Оказывается, в полупроводнике переносят ток не только оторвавшиеся от атомов электроны, но и те, что остаются связанными с атомами.

Почему это происходит?

Чтобы найти ответ, проследим за поведением электронов в кусочке полупроводника, соединенного с полюсами электрической батареи.

Вот колеблются атомы кристаллической решетки. С них непрерывно слетают электроны, которые тотчас подхватываются электрическим полем батареи и улетают прочь. Однако в каждом атоме, избавившемся от электрона, остается как бы свободное место. И оно лишь ничтожное мгновение остается пустым. Под действием электрического поля на него сразу же переходит электрон с соседнего атома. Не получая полной свободы, этот электрон просто «меняет хозяина», стремясь при этом двигаться туда, куда его влечет электрическое поле батареи. Вновь освободившееся место занимается электроном с еще более далекого атома, и т. д.

Словом, связанные электроны перемещаются по «свободным местам» в атомах по направлению к положительному полюсу батареи. Это создает значительную добавку к току через полупроводник. А «свободные места», или, как говорят физики, «дырки», тем временем перекочевывают в обратную сторону.

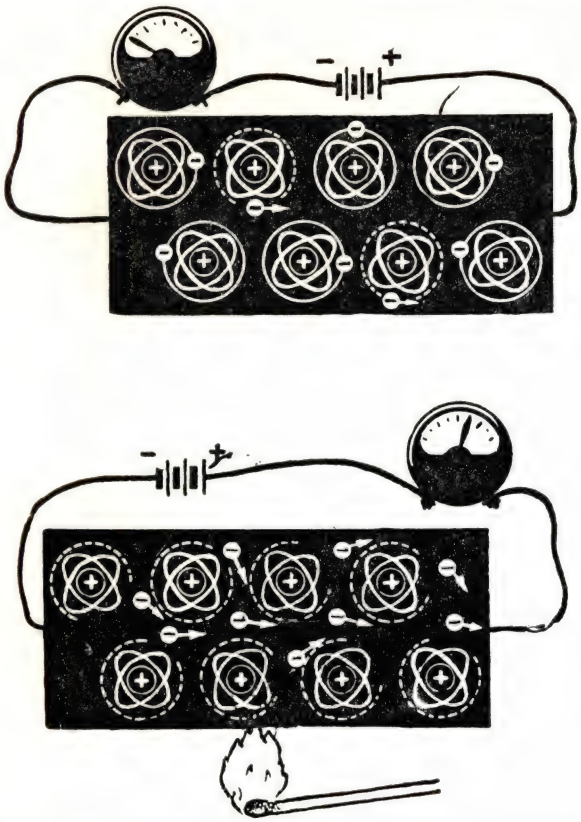


Рис. 2. Чем выше температура, тем лучше полупроводник проводит электрический ток. В этом его важное отличие от проводника. Объясняется это просто: при нагревании все больше валентных электронов отрывается от атомов полупроводника.

«ДЫРКИ»

Понятие «дырки», очень важное в теории полупроводников, стоит пояснить простой аналогией.

Перед вожатым выстроилась шеренга пионеров. Вожатый вызывает одного пионера из строя и отсылает его с каким-то поручением. В шеренге образовалось незанятое место — дырка. Раздается команда: «Сомкнуть строй!» Ребята один за другим передвигаются к правому флангу. Дырка же в строю тем временем шаг за шагом отодвигается к левому флангу (рис. 3).

В полупроводнике дырка ведет себя подобно пустому месту в шеренге пионеров. Когда по полупроводнику течет ток, свободные электроны и дырки бегут в противоположных направлениях. И вот что существенно: дырки движутся так, как обычные электрически заряженные частички, несущие заряд, равный электронному, но не отрицательный, а положительный. Закономерности движения дырок таковы, что этим «пустым местам» физики условно приписывают и так называемую «эффективную массу» — принимают для удобства расчетов, что дырки обладают определенной массой (немного большей, чем у электронов, потому что дырки не так подвижны, как электроны).

Выходит, что поведение дырки во всем подобно поведению материальной частицы с самым маленьким в природе положительным зарядом, но чуть более тяжелой, чем электрон. Эта «частица», как и свободный электрон, служит в полупроводнике носителем электрического тока.

Разумеется, надо помнить, что дырка — понятие чисто условное. Это — совсем не настоящая частица. На самом деле в ней нет ни заряда, ни массы. Пользуются понятием «дырка» лишь ради удобства, чтобы избежать сложных и громоздких рассуждений о движении электронов, связанных с атомами.

Итак, будем считать, что в полупроводнике существует два вида носителей тока — электроны и дырки. С этим связано множество явлений — не только электропроводность, но и, скажем, свечение материала, когда электроны воссоединяются с дырками, или своеобразное поведение в магнитном поле.

Если полупроводник, по которому течет ток, поместить в магнитное поле, то электроны и дырки отклоняются от прямого пути и создают разность потенциалов в перпендикулярном направлении. Это явление называется эффектом Холла. Регистрируя его, т. е. фиксируя «поперечную» электродвижущую силу в полупроводнике, помещенном в магнитное поле, удается улавливать тончайшие изменения этого магнитного поля. Высокой чувствительностью полупроводников к изменению магнитного поля пользуются для создания идеально точных компасов и других приборов.

ДВА ТИПА ПОЛУПРОВОДНИКОВ

Может показаться, что свободных электронов и дырок в полупроводнике всегда должно быть равное количество: сколько электронов соскочит с атомов, столько возникает и дырок. Но это имеет место лишь в абсолютно чистом полупроводнике, свободном даже от ничтожнейших примесей. Стоит ввести в чистый полупроводник совсем небольшое количество другого химического элемента, как появляется

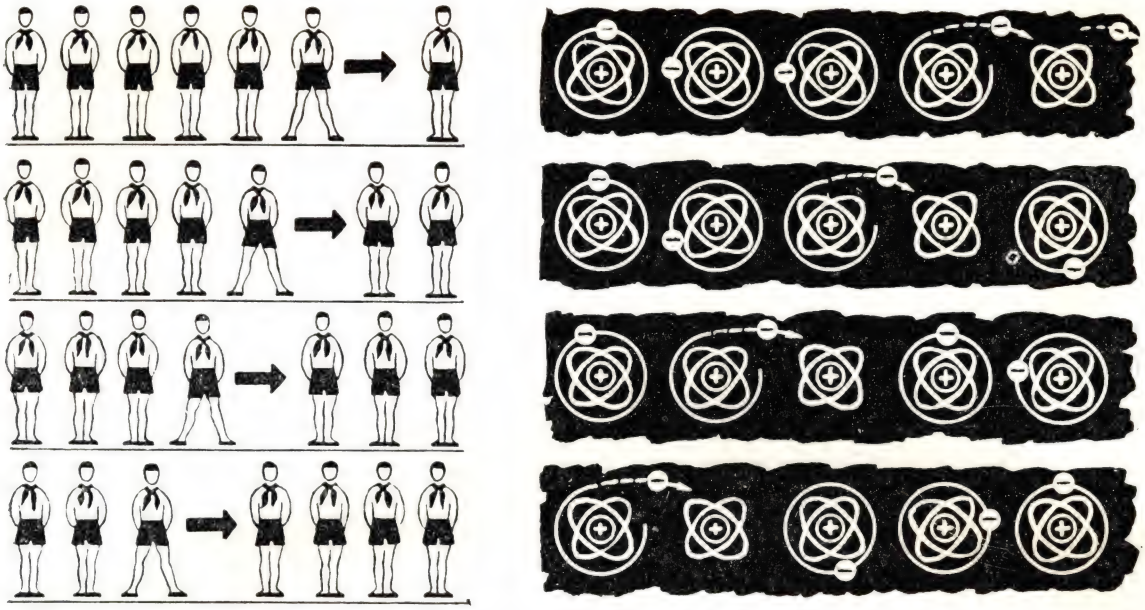


Рис. 3. В шеренге пионеров при смыкании строя вправо пустое место движется справа налево. В полупроводнике примерно так же «путешествует» не занятое валентным электроном место в атоме — дырка.

либо избыток электронов, либо избыток дырок. Например, закись меди в присутствии примеси меди обогащается электронами, а в присутствии «лишнего» кислорода — дырками. Объяснить это нетрудно. Атомы кислорода легко оттягивают на себя электроны и создают избыток дырок, в то время как атомы меди, наоборот, отдают свои электроны. Те полупроводники, в которых основными носителями тока служат электроны, называются электронными. А материалы с избытком дырок именуются дырочными полупроводниками.

Изготовление полупроводников — дело очень нелегкое. Главная трудность заключается в очистке материалов. Например, полупроводниковый кристаллический элемент германий требует иногда настолько высокой очистки, чтобы на миллион его атомов приходилось не более одного атома другого вещества. Еще большей чистоты требуют физики от кремния — на миллиард атомов не больше одного чужого! Однако современная техника неплохо справляется с задачей высшей очистки материалов. Для этого изобретено немало способов. Примеси, например, «выгоняют» особой зонной плавкой. Под влиянием высокочастотного поля полупроводник раскаляется и плавится, а затем область расплавленного материала постепенно продвигается вперед. При этом примеси как бы выталкиваются в расплав. Выращивая из расплавов кристаллы, получают очищенные материалы (рис. 4). В основе этих методов лежит известное многим явление: кристалл всегда чище жидкости, из которой он выращивается. По этой причине, например, лед, появившийся на поверхности моря, менее соленый, чем морская вода.

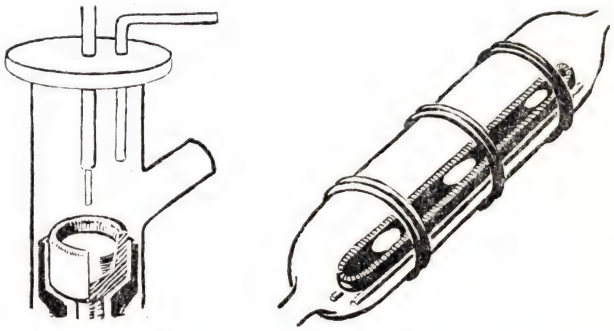


Рис. 4. Устройства, предназначенные для высшей очистки полупроводников. Слева — установка для вытягивания чистых кристаллов из расплавленного материала. Справа — аппарат для «зонной плавки» полупроводников. Под влиянием высокочастотного поля полупроводник раскаляется и плавится, а затем область расплавленного материала постепенно продвигается вперед. При этом примеси как бы выталкиваются в расплав, и застывающая часть материала очищается.

В многократно очищенный полупроводниковый материал добавляют ничтожное количество необходимых примесей. Так получают дырочные и электронные полупроводники, в сотни и тысячи раз изменяют их электропроводность, зависимость проводимости от внешних воздействий.

Возможность в широких пределах управлять электрическими свойствами полупроводников открывает им бесчисленные пути к практической службе.

ТЕРМИСТОРЫ

Самая простая особенность полупроводника — ярко выраженная зависимость его электропроводности от температуры. Чем сильнее нагрет полупроводниковый материал, тем обильнее в нем освобождаются электроны и образуются дырки, тем лучше он проводит ток (рис. 5). И сразу же напрашивается мысль делать на основе полупроводников простые и надежные электротермометры. Их называют обыкновенно т е р м и с т о р а м и.

Каких только термисторов сейчас не встретишь на наших заводах, в научно-исследовательских институтах, в больницах, колхозах! Есть, например, многометровые штанги, которыми удобно проверять температуру где-нибудь в глубине наполненного зерном элеватора. Есть термисторы, своим видом напоминающие кинжалы. Их втыкают в почву, чтобы узнать, насколько прогреты разные ее слои. Миниатюрными полупроводниковыми электротермометрами агрономы точно измеряют степень нагрева поверхности листьев растений, а врачи — температуру кожи больного.

Крошечные чувствительные элементы термисторов можно вводить прямо в кровеносный сосуд. Инженеры ставят термисторы в машины, чтобы вовремя получать предупреждения о чрезмерном разогревании детали. Очень широко начинают применяться эти приборы в автоматике, всюду, где нужно поддерживать постоянную температуру или связанные с ней физические явления (такие, как влажность, скорость движения газа).

Чувствительность некоторых полупроводниковых термометров настолько велика, что на их основе строят особые приборы — болометры, способные за несколько километров уловить тепловое излучение горящей папиросы. Конструируются и всевозможные автоматические аппараты, на первый взгляд не имеющие отношения к температуре, например «реле времени». В этом устройстве слабый электрический ток, проходя по полупроводнику, разогревает его и одновременно повышает его электропроводность с тем, чтобы спустя некоторое, заранее заданное время включить сильный ток, питающий, скажем, какой-нибудь двигатель.

Во всем этом многообразии практических применений используется самое простое свойство полупроводников — большая зависимость их электропроводности от температуры.

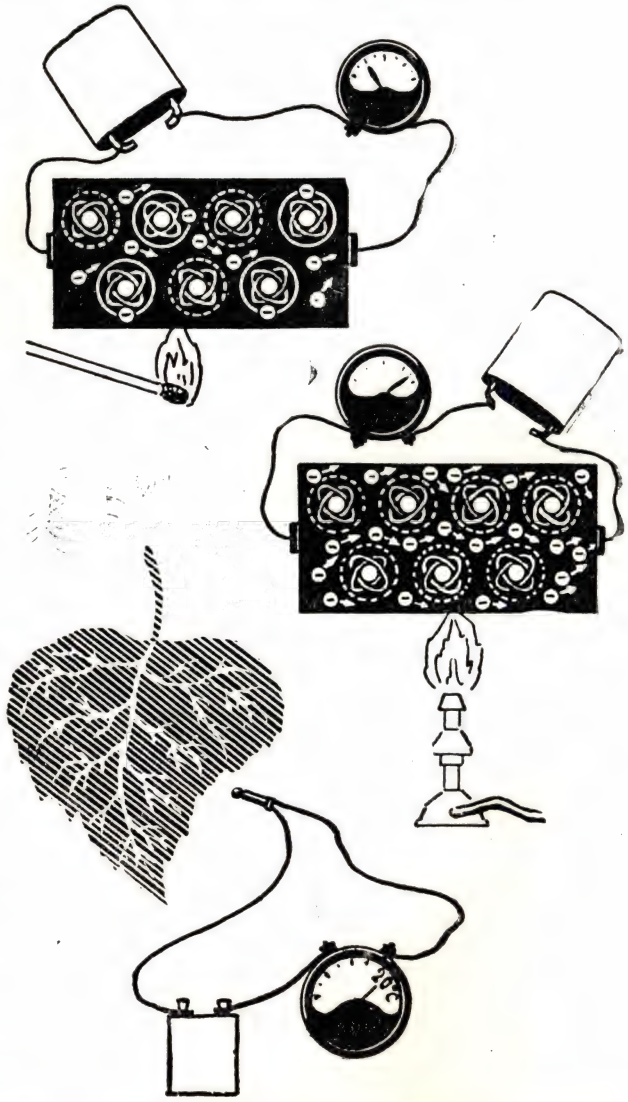


Рис. 5. Полупроводник, нагретый до разных температур, неодинаково хорошо проводит электрический ток. На этом явлении основаны разнообразные полупроводниковые измерители температуры — электротермометры, или термисторы.

МАШИНЫ ЧУВСТВУЮТ СВЕТ

Полупроводниковые материалы отзываются не только на нагревание или охлаждение. Они отлично «чувствуют» и свет, и невидимые лучи — инфракрасные, ультрафиолетовые, рентгеновские. Подобные внешние воздействия способны значительно повышать электропроводность полупроводника, вызывая в нем избыток носителей тока — электронов и дырок.

Давно уже перестали быть редкостью прочные и миниатюрные полупроводниковые «глаза» — фотосопротивления (рис. 6). Они идут в технику на смену хрупким и дорогостоящим стеклянным вакуумным фотоэлементам и надежно работают в бесчисленных автоматических устройствах. Можно, например, заставить падать на фотосопротивление тень от деталей, проходящих по заводскому конвейеру, и таким образом подсчитывать количество выпущенных изделий. Фотосопротивления умеют оценивать качество шлифовки, окраски изделия, стоят на страже здоровья и жизни людей в аппаратах техники безопасности.

Стоит рабочему случайно попасть рукой в опасное место машины, как на фотосопротивление падает тень, и ток, текущий через него, прекращается, что служит командой для немедленной автоматической остановки машины.

На применении миниатюрных фотосопротивлений основана интересная «читающая машина» для слепых, созданная у нас в стране. Ее чувствительный элемент, двигаясь вдоль строки книги, улавливает очертания букв печатного текста. Получаются электрические сигналы. А они преобразуются в движения маленьких стерженьков, которые слепой ощущает пальцами. Таким образом, он получает возможность читать обычные книги, а не только специальные, как это было до сих пор.

Всевидящие полупроводниковые «глаза» могут обладать очень высокой чувствительностью — в тысячи раз большей, чем у живого человеческого глаза. Прибавьте к этому надежность и прочность фотосопротивлений — и вы поймете, насколько ценны эти приборы для техники.

НАГРЕВАТЕЛИ И СВЕТИЛЬНИКИ

Мы уже знаем, что в полупроводниках, как и в металлах, энергия электрического тока может преобразовываться в тепло.

Представьте себе электрокипятильник для воды в виде небольшой трубки, которая надевается прямо на водопроводный кран. Трубка сделана из стекла, на которое изнутри нанесена тонкая пленка полупроводника. Когда через пленку идет ток, полупроводник сильно разогревается, и струя воды в трубке закипает. Вы открываете кран, и спустя секунду из трубки льется кипяток.

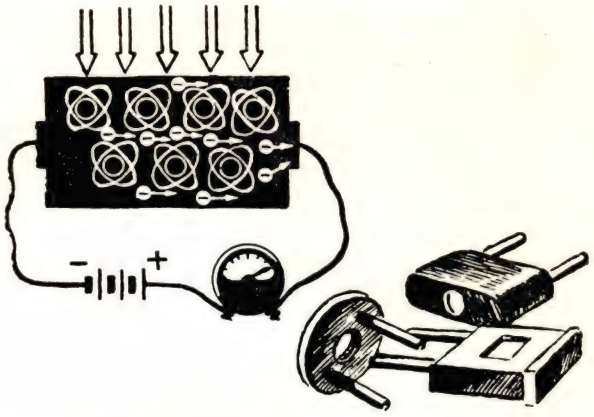


Рис. 6. Свет освобождает в полупроводнике электроны. На этом явлении основаны приборы, называемые фотосопротивлениями. Прочные и миниатюрные, они во многих случаях с успехом заменяют хрупкие вакуумные фотоэлементы.

Некоторые полупроводники под электрическим воздействием создают яркое свечение. Явление объясняется просто: в подобных полупроводниках электрическое поле вызывает воссоединение электронов с дырками. Электроны как бы «впрыгивают» на свободные места в атомах и «проваливаются» в дырки. Проваливаясь, они освобождают энергию, которая и выделяется в виде света. На этой основе физики создают экономичные, удобные светильники, плоские телевизионные экраны (рис. 7) и многое другое.

Иные полупроводниковые материалы светятся и под такими воздействиями, как потоки электронов, рентгеновских и ультрафиолетовых лучей. Подобные вещества служат отличным покрытием для экранов рентгеновских установок, телевизионных трубок, ламп дневного света. Словом, лю-

Рис. 7. Возможный вид плоского телевизионного экрана.

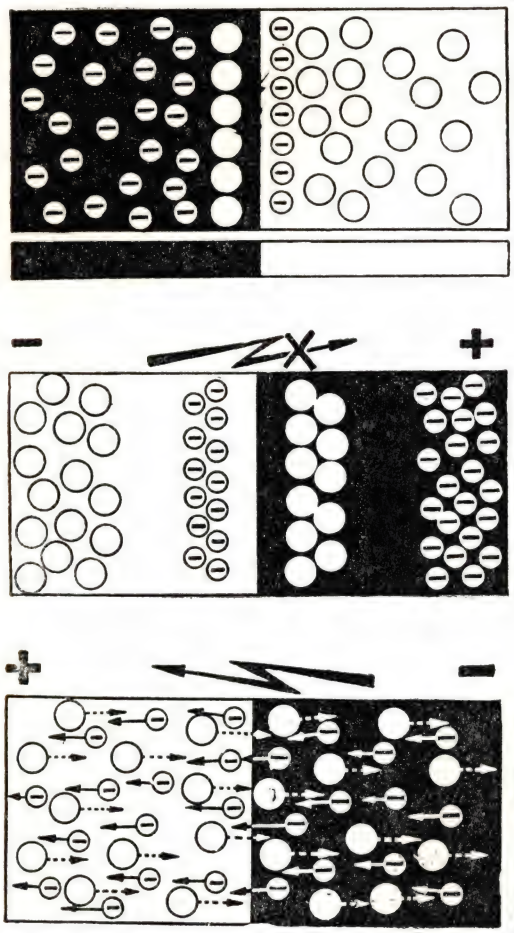


Рис. 8. На границе электронного и дырочного полупроводников возникает запирающий слой. Он пропускает электрический ток лишь в том направлении, при котором электроны и дырки движутся навстречу друг другу.

минофоры — светящиеся материалы, которые в наши дни все шире входят в технику и жизнь,— это не что иное, как полупроводники.

Из полупроводников теперь делают счетчики радиоактивных частиц, всякого рода индикаторы и указатели, которые светят непрерывно в течение десятков лет, питаясь энергией радиоактивного распада какого-либо вещества.

Известны, наконец, полупроводники, которые способны как бы заряжаться светом, а потом отдавать его по электрической «команде».

И все это многообразие практических применений связано с процессами взаимодействия внутри полупроводника электронов и дырок.

ЗАПИРАЮЩИЙ СЛОЙ

До сих пор мы говорили о технической службе полупроводников какого-либо одного вида — либо электронных, либо дырочных. Но, пожалуй, еще интереснее устройства, в которых действуют сочетания этих двух разновидностей полупроводниковых материалов.

Что происходит с куском полупроводника, в котором как бы срослись два слоя с разными примесями — электронный и дырочный?

Из электронного слоя в дырочный продвигаются электроны, а из дырочного в электронный — дырки. За границей раздела с дырочной стороны получается избыток электронов, а с электронной стороны — избыток дырок. В конце концов этих «нарушителей границы» станет настолько много, что они превратятся в своеобразных «пограничников» — станут отталкивать новых нарушителей, стремящихся перейти границу. Электронная «стража» не пустит своих собратьев из электронной области полупроводника, а дырочная «стража» закроет дорогу дыркам. Словом, на границе соприкосновения двух видов полупроводников возникнет запирающий слой, преодолеть который без помощи внешнего электрического поля носители тока не имеют возможности. Этот запирающий слой — основа многих ценнейших аппаратов и приборов, создаваемых на основе полупроводниковых материалов.

ВЫПРЯМИТЕЛИ

Техника наших дней широко пользуется выпрямителями — устройствами, которые преобразуют переменный электрический ток в постоянный. Большей частью это особые радиолампы — кенотроны. Их можно найти в любом сетевом радиоприемнике. Мощные выпрямители для электросетей радиостанций, электроплавильных печей, электровозов до недавних пор делались лишь на основе приборов газового разряда, таких, например, как ртутные лампы, а также электромеханических машин — мотор-генераторов. А это бывает порой очень неудобно. Подобные выпрямители громоздки (для мощного мотор-генератора строят целое здание), неэкономичны, часто выходят из строя. Можно себе представить радость электротехников, когда они узнали, что полупроводниковый запирающий слой открыл надежду делать выпрямители прочными, надежными, миниатюрными и вместе с тем рекордно экономичными.

В полупроводнике, состоящем из дырочной и электронной областей, запирающий слой представляет собой как бы пограничное электрическое поле определенного направления. Если на такой слой извне наложить поле такого же направления, то оно как бы усилит «стражу» электронов и дырок — «пограничников». Поле же, направленное в обратную сторону, наоборот, сметет эту «стражу» — разрушит запирающий слой (рис. 8). А если подвести переменное, т. е. меняющее направление, поле? Тогда запирающий слой станет то расширяться, то исчезать. В результате во время расширения запирающего слоя ток через полупроводник не пойдет, а в моменты исчезновения — пойдет. Значит, наш двухслойный полупроводник способен играть роль выпрямителя.

Купроксные (на закиси меди) и селеновые выпрямительные устройства уже давно нашли свое место в технике. Сейчас уверенно внедряются мощные выпрямители из германия и кремния. В ближайшие годы они во многих отраслях техники вытеснят дорогие и ненадежные кенотроны, ртутные колбы, мотор-генераторы.

КРИСТАЛЛЫ И ЛАМПЫ

Стоит отметить, что простейший полупроводниковый выпрямитель был широко распространен лет 30—35 назад, на заре развития радиовещания. Речь идет о детекторе — сердце детекторного радиоприемника (рис. 9). Кристаллик детектора преобразовывал быстропеременные электрические колебания, пойманные антенной, в пульсирующие постоянные токи, которые в наушниках рождали звук.

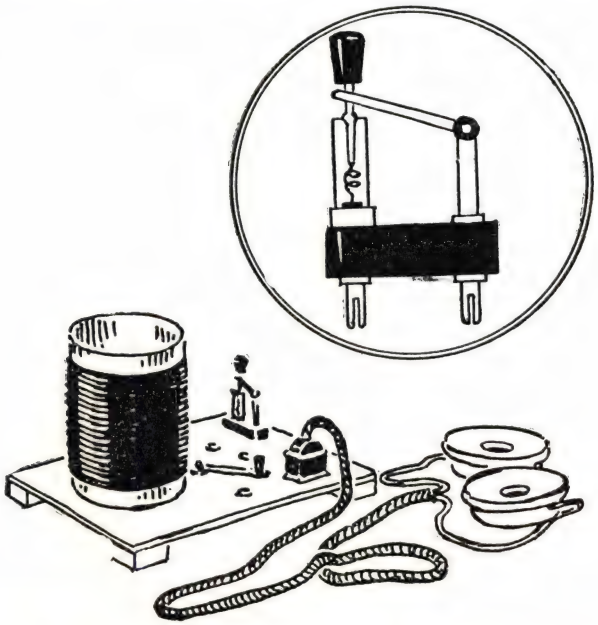


Рис. 9. Так выглядят простейший детектор и собранный на нем детекторный приемник.

Конечно, в те времена детекторы работали не слишком хорошо. Включая приемник, приходилось нащупывать на кристалле проволочкой «чувствительную точку», которая то и дело сбивалась. Улучшением детектора занимались многие изобретатели. В их числе был сотрудник Нижегородской радиолаборатории О. В. Лосев. Сочетая в схеме два детектора, он научился слегка усиливать радиосигналы и возбуждать электрические колебания. Приемники Лосева — «кристадины» — долгое время пользовались популярностью. Но потом, когда детекторы уступили место радиолампам, о кристадинах забыли.

Рис. 10. Полупроводниковые радиоприборы несравненно меньше радиоламп.

Несколько десятилетий радиолампы безраздельно владели радиотехникой. Осваивая и совершенствуя эти приборы, радиотехника добилась огромных успехов. С их участием развились радиовещание, телевидение, радиолокация, автоматика, телемеханика. Появилась новая обширная область знания — электроника. Но постепенно становилось ясно, что радиолампы далеко не безупречны. Хрупкие, недолговечные, неэкономичные, они все меньше удовлетворяли конструкторов. И тогда вспомнили о полупроводниковом детекторе. Возникла идея заменить твердым камешком стеклянный пузырь радиолампы.

Немало усилий потратила наука, чтобы «научить» детектор новым «профессиям». Надо было создать сочетание полупроводниковых кристаллов, способное не только выпрямлять токи, но и в широких пределах усиливать и генерировать электрические колебания. В 1948 г. проблема нашла решение. Американцы Бардин и Браттейн создали первый полупроводниковый усилительный прибор — триод. Теорию триода развил их соотечественник Шокли.

Как же устроен и действует полупроводниковый заменитель радиолампы (рис. 10)?

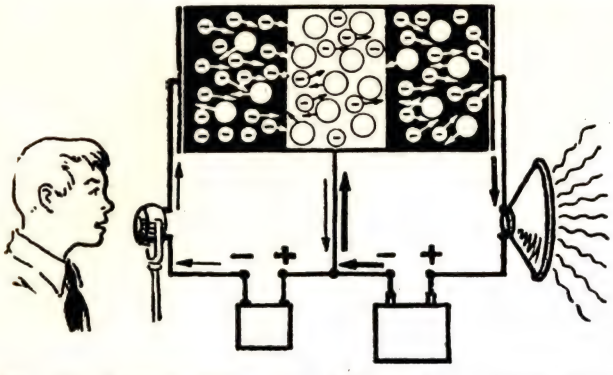


Рис. 11. Упрощенная схема действия полупроводникового триода.

ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЙ ТРИОД

Представьте себе крошечный кусочек электронного германия. На верхней грани его специальной обработкой создана область с дырочной проводимостью. Между дырочной и электронной областями образуется, как всегда, запирающий слой.

Кристаллик снизу припаян к металлической пластинке — базе, а сверху к нему присоединены рядышком две тонкие проволочки — эмиттер и коллектор.

Усиливаемые сигналы подаются к эмиттеру и базе в «пропускном» направлении запирающего слоя. И тогда в цепи между базой и коллектором, где включено сравнительно высокое постоянное напряжение в «запретном» направлении, возникают усиленные сигналы (рис. 11).

Почему это происходит?

Когда подается сигнал, через проволочку эмиттера в дырочную область полупроводника входит импульс электрического поля. Он без помех прорывает запирающий слой, увлекая за собой дырки. Другими словами, дырки словно впрыскиваются в электронную область кристалла. Недолго блуждая там, они попадают под проволочку коллектора. И когда там запирающий слой на мгновение обогащается дырками, он делается электропроводным также для тока высокого напряжения, включенного между базой и коллектором. Пользуясь снятием «запрета», толчок этого тока немедленно проскакивает между коллектором и базой. Во внешней цепи прибора возникает усиленный сигнал.

Таково вкратце действие полупроводникового триода, который называют точечным (ибо контакты эмиттера и коллектора — точки). Существуют кристаллические усилители и другой системы — плоскостные. Свободные от тончайших проволочек, они способны усиливать бо́льшие токи. Изготавливаются также кристаллические тетроды, пентоды (приборы с четырьмя и пятью контактами), предназначенные для работы с колебаниями высоких частот.

Безостановочно расширяется внедрение в практику этих замечательных устройств — надежных, прочных, компактных, исключительно экономичных в потреблении энергии. С приходом полупроводников в радиотехнике совершается подлинный переворот.

НАДЕЖНОСТЬ, МИНИАТЮРНОСТЬ

Обходясь без радиоламп, передатчики и приемники удается делать исключительно прочными. Их можно смонтировать даже в обыкновенном слесарном молотке. Сколько ни стучи таким молотком, радиоаппараты не испортятся, не перестанут работать. Радиостанцию на кристаллах можно вмонтировать в артиллерийский снаряд, поставить на искусственный спутник Земли, на межпланетный корабль. Ей не страшны ни самая сильная тряска, ни самые резкие удары.

Очень ценна и миниатюрность полупроводниковых радиоприборов. Уже перестал быть редкостью приемник величиной с портсигар, даже со спичечную коробку (рис. 12). Читатель, немного знакомый с радиотехникой, без труда построит миниатюрный полупроводниковый приемник. Или вообразите себе медицинский «радиозонд» для исследования внутренних органов человека — маленькую, вроде фасолины, «пилюлю», в которой спрятан радио-

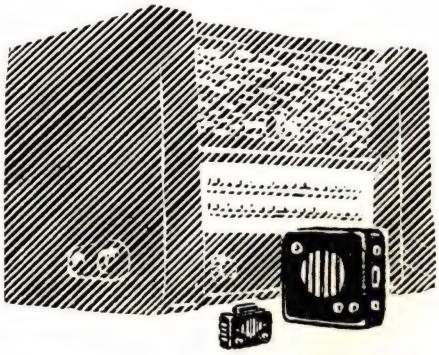


Рис. 12. Все миниатюрнее, компактнее становятся с приходом полупроводников радиоприемники. Уже не редкостью стали радиоаппараты величиной с портсигар, даже со спичечную коробку.

передатчик на кристалликах. Человек проглатывает эту «пилюлю», и она, блуждая по кишечнику, методично посылает условные радиосигналы о состоянии внутренних органов, об их температуре, давлении и т. д.

Огромную роль обещают сыграть полупроводники в развившейся за последние годы электронно-вычислительной технике. Поначалу в кибернетические машины приходилось ставить сотни и тысячи радиоламп, потому что эти устройства «думали» именно при помощи радиоламп. Понятно, что занимали они большие комнаты, целые залы, даже отдельные здания, к тому же часто портились, а при работе потребляли огромное количество энергии. Но, когда появились полупроводники, электронные счетные и управляющие машины были быстро «переучены». Они научились «думать» с помощью кристаллических триодов и других полупроводниковых деталей. Кибернетический «мозг» уменьшился во многие сотни раз. Энергии ему требуется теперь совсем немного.

Тысячу полупроводниковых триодов ученые сумели вместить в объем спичечной коробки. Тысячеламповый приемник — у вас на ладони!

БУДУЩЕЕ РАДИОТЕХНИКИ

Для миниатюрных радиоустройств на кристаллах изобретены и соответствующие им крохотные источники питания, например батарейки величиной с трехкопеечную монету. Благодаря скромности «аппетита» полупроводников, такой батарейки им хватает на несколько месяцев. Строятся радиопередатчики, в которых источником энергии является сам передаваемый звук. Человек говорит в микрофон, акустические колебания преобразуются в импульсы тока: одна часть их поступает на усиление, а другая — сглаживается и питает усилитель энергией. Весь передатчик умещается в корпусе микрофона. Предложено использовать для питания радиоприемников и даже радиопередатчиков на полупроводниках энергию радиоволн. Если приемник настроен на какую-либо радиостанцию, то энергия радиоволн другой работающей в это время радиостанции тоже улавливается, но не усиливается, а питает кристаллические триоды усилителя.

Каждый день приносит новые вести о совершенствовании кристаллических заменителей радиоламп, улучшении сложнейшей, ювелирной технологии их производства, изменении самих принципов их работы. Физики предложили, например, погружать полупроводниковые усилители в жидкий гелий. Там при сверхнизкой температуре действие приборов обрело небывалую точность и чистоту.

Переворот в радиотехнике вызывается не только германиевыми и кремниевыми приборами. Добрую службу начинают служить легкие магнитные полупроводниковые материалы — ферриты, из которых делают, например, антенны величиной с карандаш. Входят в практику предложенные советским физиком Б. М. Вулом титанаты бария, ведущие к резкому снижению размеров и новым возможностям применения таких деталей, как конденсаторы. Есть надежда, что из ферритовых пластинок с «заплатками» из титанатов бария вскоре можно будет как бы печатать радиоприемники — словно открытки или почтовые марки.

Слов нет, достижения полупроводниковой радиотехники очень велики. Но было бы неверно думать, что кристаллические приборы вступают во вражду с электронно-вакуумными устройствами. У тех и других остаются свои достоинства, которые определяют разные пути их дальнейшего развития. Кристаллические триоды, в отличие от радиоламп, очень трудно изготовлять без «разброса параметров», так, чтобы по своим электрическим характеристикам все они были строго одинаковы.

Кроме того, германиевые диоды и триоды не терпят резких перемен температуры (этот недостаток, правда, почти отсутствует у кремниевых приборов). Наконец, мощность кристаллических усилителей хотя и возрастает с каждым годом, но еще сильно уступает мощности радиоламп.

Показательно, что полупроводники оказывают немало услуг вакуумной электронике: из них делаются эффективные источники электронов для радиоламп, устройства, поджигающие разряд в ртутных выпрямителях, и т. д. Словом, не конкуренция, а деловое соревнование, тесное сотрудничество разворачивается сейчас между техникой полупроводников и вакуумной электроникой.

ЭЛЕКТРОЭНЕРГИЯ ИЗ ТЕПЛА

Важнейшая особенность полупроводников — в чрезвычайной многогранности их возможностей. Мало того, что, например, радиоприемник может действовать на кристаллических триодах. Оказывается, и питание ему могут поставлять полупроводники.

Рис. 13. При нагревании спая термопары, столбики которой изготовлены из электронного и дырочного полупроводников, на противоположных концах столбиков возникает электродвижущая сила. Это явление лежит в основе термоэлектрогенераторов — приборов, непосредственно преобразующих теплоту в энергию электрического тока.

В далеких деревнях и селах, в домах лесников и бакенщиков сейчас часто можно встретить своеобразную керосиновую лампу-электростанцию, которая не только светит, но и дает электрическую энергию радиоприемнику. Секрет устройства довольно прост. Специально приготовленные полупроводниковые брусочки смонтированы в виде трубки, которую надевают на укороченное ламповое стекло. Когда лампа зажжена, то изнутри торцы этих брусочков разогреваются теплом горячих газов, поднимающихся от пламени. Наружные же их концы охлаждаются через радиатор комнатным воздухом. И в результате в полупроводниковой батарее рождается электрическая энергия. Почему?

Батарея построена из брусочков двух типов — электронных и дырочных. Тех и других — равное число, и все они соединены парами. В каждой паре — разные полупроводники, спаянные металлической пластинкой, наложенной на торцы. Получается нечто вроде буквы «П» (рис. 13). Вспомним теперь, что место спая нагревается, а противоположные концы брусочков охлаждаются. Нагрев рождает избыток носителей тока, причем в разных полупроводниках — разного знака. В электронном брусочке освобождаются электроны, а в дырочном — дырки. И из нагретых концов брусков, где возникает как бы «толчея» носителей тока, они перекочевывают в холодные концы, где «спокойнее». В результате в холодном конце дырочного брусочка возникает положительный заряд, а в холодном конце электронного брусочка — отрицательный. Соедините их проволочкой, и по ней потечет ток, возбужденный с помощью тепла.

ПРИМЕНЕНИЯ ТЕРМОЭЛЕКТРОГЕНЕРАТОРОВ

Полупроводниковые термоэлектрогенераторы обещают принести немалую пользу технике. В самом деле, вдумайтесь, какова суть этих приборов. Тепло в них переделывается в электроэнергию сразу, непосредственно — совсем не так, как, скажем, на современных тепловых электростанциях, где работают паровые котлы, турбины, электрогенераторы. В полупроводниковых термобатареях нет никаких промежуточных преобразований энергии, никаких движущихся частей. Как заманчиво было бы ставить большие батареи полупроводников прямо в топки электростанций!

Однако в наши дни подобные устройства применяются лишь в маленьких приборах, таких, как керосиновая лампа, о которой вы читали (рис. 14). Дело в том, что по экономичности они пока уступают обычным способам выработки электроэнергии. Коэффициент полезного действия термопары составляет 6—8%, а в лабораторных условиях — около 10%. Это, вообще говоря, немало. Примерно таков же к.п.д. паровоза. Но все же это в несколько раз меньше к.п.д. современных тепловых электростанций.

Физика стремится сейчас усовершенствовать полупроводниковые термоэлектрогенераторы — повысить их мощность и экономичность.

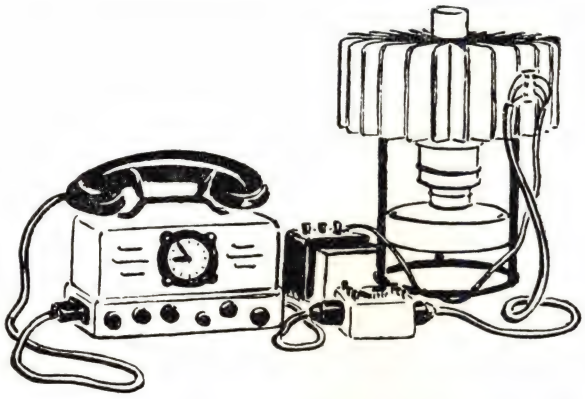


Рис. 14. Термоэлектрогенератор на керосиновой лампе. Прибор питает энергией колхозную радиостанцию «Урожай».

Но и в нынешнем виде они могут использоваться довольно широко. Эти приборы можно применять всюду, где стоит задача освоения так называемого низкопотенциального тепла, т. е. теплоты, заключенной в массах вещества со сравнительно невысокой температурой: в дыме заводских труб, в сбросных водах заводов. Значительное количество этой теплоты, которое сейчас бесполезно теряется, с помощью полупроводников может быть преобразовано в электроэнергию. Некоторые работы в этом направлении уже ведутся. Например, создан термоэлектрогенератор, вырабатывающий электрический ток из тепла выхлопных газов автомобильного двигателя. Полученная энергия сразу же идет на подзарядку аккумуляторов.

НОВЫЕ ХОЛОДИЛЬНИКИ

С брусочками полупроводниковых термопар можно делать странные на первый взгляд превращения. Мы нагреваем и охлаждаем их с разных сторон, и они порождают электроэнергию. А что если просто пропустить через них электрический ток? Тогда они с одной стороны нагреются, а с другой — охладятся. Это понятно. Внешнее электрическое поле перераспределит электроны и дырки, как бы «растянет» их в разные места. Там, где возникнет недостаток носителей тока, они начнут образовываться заново, черпая на это энергию окружающей среды и тем самым охлаждая ее. Наоборот, всюду, где носителей тока будет избыточное количество и электроны станут воссоединяться с дырками, энергия начнет выделяться в виде теплоты. Таким образом, благодаря появлению в брусочках мест с избытком и недостатком носителей тока возникает разность температур.

На этой основе в Институте полупроводников Академии наук СССР под руководством акад. А. Ф. Иоффе разработано несколько систем холодильников. В них вы не найдете никаких движущихся жидкостей, никаких моторов и компрессоров. В заднюю стенку холодильного шкафа вмонтирована небольшая плитка, собранная из полупроводниковых термопар. Она соприкасается с радиатором, выходящим своими пластинами наружу и внутрь. Полупроводниковый же выпрямитель преобразует сетевой ток из переменного в постоянный, который и идет на питание холодильника. Вот и все. Холодильник действует, совершенно не изнашиваясь, а по экономичности последние модели этих устройств почти не уступают обычным холодильным установкам. Сейчас полупроводниковые холодильники успешно действуют на борту нескольких самолетов ТУ-104.

Способность полупроводников создавать искусственный холод пригодится, конечно, не только в быту. Для научных исследований созданы холодильники-малютки величиной с наперсток. Никаким другим способом их построить невозможно. Врачи надеются получить от физиков холодильный полупроводниковый пластырь, даже охлаждающее устройство, предназначенное для ввода прямо в человеческое тело. Все это под силу технике наших дней.

НАГРЕВ ВМЕСТЕ С ОХЛАЖДЕНИЕМ

Стоит переменить направление тока через полупроводниковую батарею — и холодильник словно «выворачивается наизнанку». Там, где был недостаток носителей тока, теперь избыток, и наоборот. Тепло и холод меняются местами (рис. 15). Греются уже не внешние, а внут-

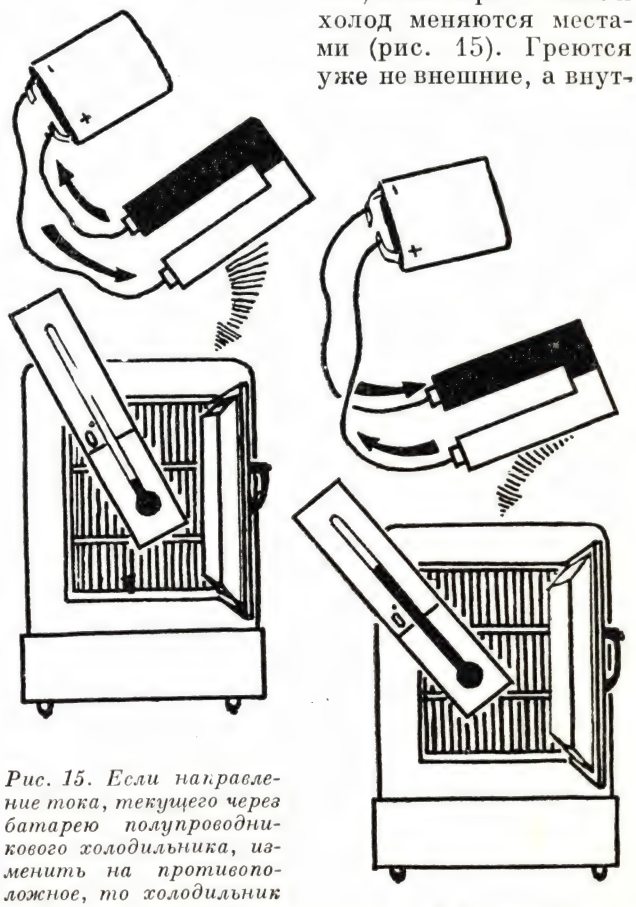


Рис. 15. Если направление тока, текущего через батарею полупроводникового холодильника, изменить на противоположное, то холодильник как бы «выворачивается наизнанку». В его шкафу температура повышается, а снаружи, наоборот, понижается.

ренние концы полупроводниковых брусочков. Из холодильника получается духовой шкаф. Разумеется, и эту возможность, совершенно недоступную обычным холодильным аппаратам, техника охотно использует всюду, где необходимо поддерживать постоянную температуру, попеременно разогревать и охлаждать какую-либо деталь и т. д. Например, германиевые полупроводниковые триоды плохо переносят изменения температуры, поэтому их полезно помещать в полупроводниковые же термостаты.

Или другая любопытная возможность — полупроводниковая отопительно-охлаждающая система для зданий.

Войдя в жилой дом недалекого будущего, вы заметите в комнатах под подоконниками широкие пластины радиатора. Но это не центральное отопление. Такие же пластины вы найдете и с наружной стороны стен. А между радиаторами —батареи полупроводниковых термопар. Пропуская через них постоянный ток в определенном направлении, мы заставляем комнатный радиатор нагреваться. Так жилище отапливается. А летом, в жаркую погоду, ток включается в обратном направлении. Теперь комнатный радиатор вбирает в себя теплоту окружающего воздуха и охлаждает помещение.

Эта система проста, надежна, гигиенична. Но, пожалуй, главное ее достоинство — в большой экономичности. Оказывается, комната станет обогреваться не только за счет энергии электрического тока, пропускаемого через полупроводники. В какой-то мере отоплению поможет охлаждение и без того холодного уличного воздуха. Ведь он тоже будет «работать», отдавая свое тепло наружному радиатору. Правда, при сильном морозе «переброска» тепла снаружи здания внутрь будет незначительна. Но при сравнительно теплой погоде этот полупроводниковый «тепловой насос» может принести большую пользу. Первый отопительно-охладительный полупроводниковый агрегат уже создан в Москве на заводе «Сантехника».

Итак, полупроводники преобразуют тепло в электроэнергию. Не менее эффективно они способны преобразовывать в электрическую энергию и свет.

ВЕНТИЛЬНЫЙ ФОТОЭЛЕМЕНТ

Среди наших читателей, несомненно, найдется немало фотолюбителей, а из них многие знакомы с удобным прибором для определения экспозиции при съемке — фотоэлектрическим экспонометром. Вы открываете крышку прибора, направляете его «глаз» на предмет, который хотите сфотографировать, и стрелка на шкале тут же показывает, какую надо сделать выдержку. Прибор примечателен тем, что не требует никаких источников питания: батареек, аккумуляторов. Он преобразует световую энергию в энергию электрического тока, отклоняющего стрелку. Свет превращается в ток.

Чувствительный элемент экспонометра выполнен из полупроводника селена, обладающего дырочной проводимостью. Он лежит на стальной подложке. На поверхность же селена тоже нанесена тонкая пленка металла, например золота. И эта добавка превращает поверхностную область полупроводника из дырочной в электронную (рис. 16).

Что происходит под действием света?

В электронной области «обстрел» световыми частицами (фотонами) освобождает из «плена» атомов новые электроны. Они мечутся, сталкиваются и, «не умещаясь» в тоненьком слое электронного селена, уходят в пленку золота. Иного пути у них нет, так как в дырочную

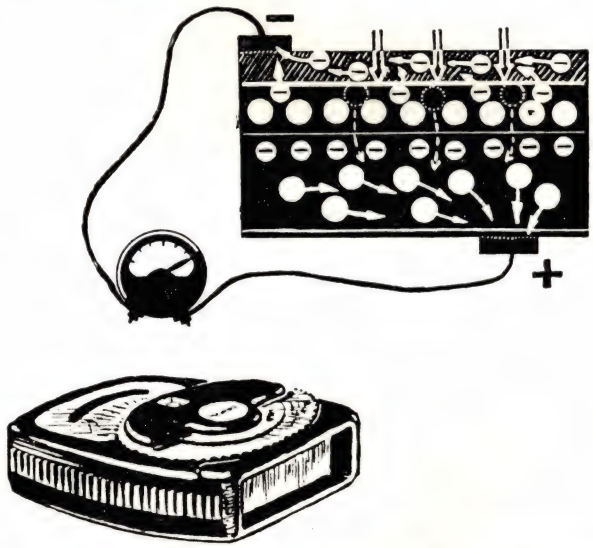


Рис. 16. Упрощенная схема вентильного полупроводникового фотоэлемента. Наверху — тонкая пленка металла, ниже — область электронной проводимости. Далее следуют запирающий слой, область дырочной проводимости и металлическая подложка. Электроны, освобожденные светом в области электронной проводимости, уходят в верхнюю пленку металла, а дырки свободно проникают через запирающий слой и уходят на металлическую подложку. Так между двумя противоположными поверхностями фотоэлемента возникает электродвижущая сила. Энергия света преобразуется в электрическую энергию. В фотоэлектрическом экспонометре, знакомом каждому фотографу-любителю, имеет место именно это явление.

область дорога закрыта запирающим слоем. Поэтому в пленке золота накапливается избыток электронов — отрицательный электрический заряд. Вместе с электронами в электронной области, естественно, образуется и некоторое количество дырок. Для них запирающий слой не преграда. Положительный заряд — как бы «пропуск» для прохода через границу. И благодаря этому на стальной подложке возникает положительный заряд. Как видите, энергия света пошла на создание разности потенциалов между противоположными поверхностями нашего полупроводникового прибора. Соединив их проволочкой, мы получим электрический ток, который будет течь, пока селен освещен.

Такие вентильные, по терминологии физиков, фотоэлементы известны уже довольно давно. Они широко применяются в различных автоматических устройствах. Например, полупроводниковые вентильные фотоэлементы отлично справляются с анализом крови (фиксируя ничтожные различия в количестве красных кровяных телец), непрерывно следят за насыщенностью крови кислородом при хирургических операциях и т. д. Однако до недавних пор полупроводниковые фотоэлементы страдали очень низким коэффициентом полезного действия—они преобразовывали в электрическую энергию лишь тысячные доли энергии светового потока.

СВЕТ РАБОТАЕТ

Несколько лет назад положение в этой области резко изменилось к лучшему. Из крупных, специально выращенных кристаллов полупроводника кремния, разделенных на тонкие пластинки, удалось создать фотоэлементы, способные преобразовывать в электрический ток до 13% энергии падающего на них света. Квадратный метр поверхности, освещенной солнцем, способен дать до 120 *вт* электроэнергии. Это — огромный успех. Посудите сами: батарея кремниевых фотоэлементов площадью в половину газетной страницы в солнечный день может питать стандартный электромотор швейной машины.

Несмотря на трудность очистки и обработки кристаллов кремния, вентильные кремниевые фотоэлементы уверенно внедряются в технику. Советские конструкторы создали, к примеру, миниатюрный полупроводниковый радиоприемник «Спутник», питающийся энергией от солнечной батареи. За рубежом выпускаются часы, «заводящиеся» светом, фото- и киноаппараты, которые сами не только угадывают экспозицию, но и «солнечной силой» устанавливают нужную диафрагму.

В США солнечные батареи питают энергией телефонные подстанции. Построены модели механизмов оросительных систем, «солнцемобилей» и судов, использующих энергию солнечных лучей. Представьте себе экипаж, который движется без всякого горючего лишь потому, что освещен солнцем. Правда, наземные транспортные средства такого рода едва ли получат сколько-нибудь заметное распространение. Мощность солнечного излучения для них все же мала. Но, скажем, речные баржи, обладающие большой поверхностью, вполне способны были бы двигаться за счет энергии солнечных лучей.

В наземном транспорте солнечные батареи послужат, видимо, дополнительными и аварийными источниками энергии. Если в электромобиле истощатся аккумуляторы, то до зарядной станции он «дотянет» на солнечных лучах, улавливаемых крышей-фотоэлементом. К тому же на любой дневной стоянке подобный экипаж будет непрерывно набирать энергию в собственные аккумуляторы.

К СОЛНЕЧНОЙ ЭНЕРГЕТИКЕ

Особенно велика ценность полупроводниковых «ловушек света» для нужд энергетики, которую принято называть «малой». Солнечные батареи (рис. 17) станут создавать обилие энергии в неэлектрифицированных районах — в горах, на островах, в тайге, всюду, куда трудно

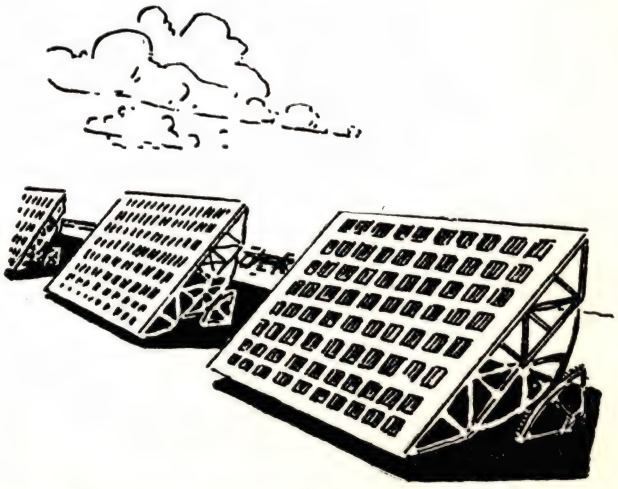


Рис. 17. Быть может, так будут выглядеть батареи солнечной электростанции.

тянуть линию электропередач, а строить электростанции невыгодно. Подсчитано, что если на крыше дома разместить солнечные фотоэлементы, то они обеспечат энергией и отопительные электропечи, и кухонные плиты, и осветительные приборы,— словом, все бытовые нужды. Днем энергия будет накапливаться в аккумуляторах на темное время суток. А как заманчиво было бы устроить солнечные фотоэлементы в виде ткани, скатывающейся в рулон! На привале геолог или турист размотает такой коврик, разложит его — и готова электростанция. Можно включить электроплитку, миниатюрный полупроводниковый холодильник или, скажем, обогреть воздух в палатке.

На третьем советском искусственном спутнике Земли и автоматической межпланетной станции солнечные батареи дают электрический ток радиостанциям и другим приборам летающих космических лабораторий. Это — зримый предвестник широкого использования вентильных фотоэлементов на межпланетных кораблях будущего. Свет не надо брать с Земли. Двигаясь к Марсу, Венере, Меркурию, ракета полетит перед незаходящим Солнцем, купаясь в его мощном световом потоке. И даже при нынешнем коэффициенте полезного действия солнечных батарей применение их на десятки тонн снизит вес космического корабля.

Следует отметить, что современные кремниевые фотоэлементы, по всей видимости, еще не самые эффективные. Идет работа над их совершенствованием и, главное, над изысканием новых материалов, способных освоить бóльшую долю световой энергии, чем кремний. Теоретически возможно создание полупроводниковых солнечных батарей, превращающих в электрический ток почти половину энергии падающего на них света.

ПОЛУПРОВОДНИКИ И ЖИЗНЬ

Рождение солнечной энергетики — начало нового этапа в истории техники.

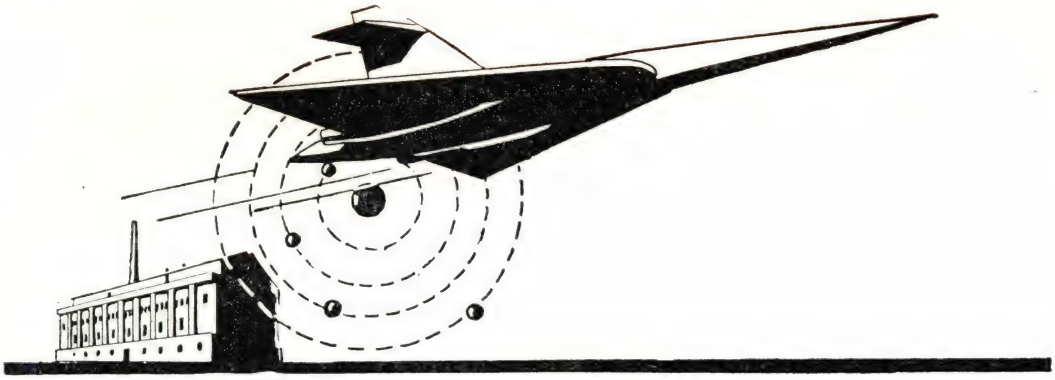
До недавних пор лишь растения могли задерживать, накапливать и использовать энергию солнечного луча. Все запасы ископаемого топлива, в конечном итоге,— «консервы Солнца», заготовленные некогда зелеными листьями древних растений. С помощью полупроводников человек лишил природу этой монополии.

Между прочим, в зеленом листе, как выясняется, происходят явления, весьма схожие с теми, которые протекают в вентильных фотоэлементах. Сегодня в лабораториях с помощью окрашенных полупроводников уже осуществлен первый этап фотосинтеза — знаменитого процесса накопления солнечной энергии, преобразующего свет в химическую энергию живого вещества зеленого листа, процесса, который питает всю органическую жизнь Земли. И перед наукой теперь открылась заманчивая перспектива — осуществить искусственный фотосинтез. Предстоит научиться быстро приготовлять под действием света сложные органические соединения прямо из углекислого газа и воды, минуя естественную лабораторию растений. Успехи физики полупроводников вместе с достижениями химии и биологии уверенно ведут к решению этой проблемы.

Физика полупроводников и в других областях тесно соприкасается с наукой о жизни. Электронные явления, сходные с процессами в запирающих слоях, играют огромную роль в физиологии нервной системы, а процессы, подобные вентильному фотоэффекту,— в физиологии зрения.

Характерно, что полупроводники бывают не только кристаллическими, но и стекловидными и жидкими. Поэтому не удивительно, что они приобретают большое значение для химии. Известное явление катализа, когда малые добавки тех или иных веществ резко ускоряют ход химических превращений, оказывается, можно объяснить влиянием примесей на электронные полупроводниковые процессы. В биохимических реакциях катализаторами служат сложные органические вещества, называемые ферментами, причем живая ткань автоматически регулирует их состав и состояние. Так наш организм ведет управление различными жизненными процессами.

Необыкновенно широк диапазон учения о полупроводниках. Овладевая ими, человек обогащает физику и химию, движет к новым высотам технику, раскрывает вековые загадки биологии. Недаром в контрольных цифрах семилетнего плана, принятых на внеочередном XXI съезде КПСС, полупроводники названы в числе важнейших научных проблем. Сегодня даже трудно вообразить в полной мере плоды грядущего развития физики полупроводников. С каждым годом эти замечательные материалы будут прочнее входить в нашу жизнь.



Ядерная энергия

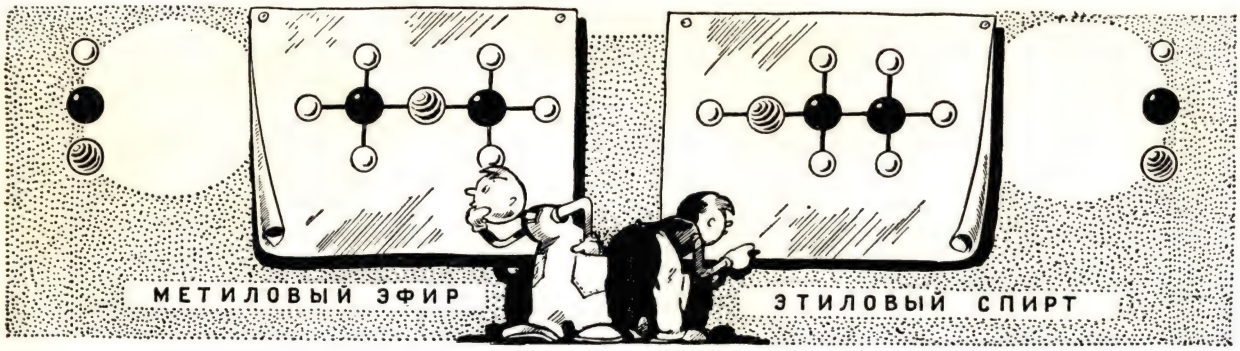
СТРОЕНИЕ АТОМА И АТОМНАЯ ЭНЕРГИЯ

Множество разнообразных веществ окружает нас. Мы видим вокруг бесчисленное количество не похожих друг на друга предметов, различных жидкостей; встречаемся и с газами. Они входят в состав воздуха, которым мы дышим.

Те данные, которыми располагает современная наука о строении вещества, настолько необычны для неподготовленного читателя, что кажутся просто невероятными. Например, «пустоты» в любых телах больше, чем собственно вещества (в обычном понимании этого слова), сосредоточенного в молекулах. Молекулы — это мельчайшие частицы вещества. Они бывают самыми различными по составу и массе.

Если мысленно делить вещество, то в конце концов мы доберемся до крохотной доли его — молекулы. Эта кроха будет сохранять все химические свойства вещества. Правда, о некоторых свойствах ее трудно говорить. Можно утверждать, что у сахара она сладкая, а у соли — соленая. Но кто пробовал на вкус одну молекулу!

Увидеть молекулы довольно трудно. Некоторые из них удалось разглядеть лишь совсем недавно. Этому помогли новейшие сложные приборы — электронные и ионные микроскопы. Мы говорим о молекулах, не отдавая себе отчета в том, насколько они малы по сравнению с самыми мелкими предметами, которые мы видим. Мы считаем мельчайшим предметом пылинку, которая парит в воздухе. Но она — Эльбрус



Состав один, а молекулы разные.

по сравнению с молекулой. В нашей обыденной жизни не найдется ничего, что можно было бы сравнить по величине с этой частицей.

Молекулы чрезвычайно разнообразны не только по свойствам, но и по размерам. Молекулы большинства окружающих нас веществ (кислорода и азота, из которых состоит воздух, кремнезема и извести, из которых построены наши дома, воды, соли, которую мы кладем в пищу, и многих, многих других) настолько малы, что даже на срезе человеческого волоса их уместилось бы несколько миллионов штук.

Но есть в этом мире карликов и свои «гиганты». Конечно, и они неизмеримо меньше, чем привычные нам самые мелкие предметы. Но все же они в сотни тысяч и миллионы раз больше молекул воды или поваренной соли. Таковы молекулы растительной клетчатки (из которой состоит, например, всем известная вата), каучука, большинства пластмасс.

САМЫЕ МАЛЕНЬКИЕ

Молекула еще не самая мельчайшая частица вещества. В некоторых случаях она оказывается даже очень большой частичкой. Ее еще можно делить дальше: появятся какие-то новые, более простые частички. Однако свойств «породившей» их молекулы они уже иметь не будут.

Свыше двух тысяч лет назад родилось слово, которое сейчас знает любой школьник, — атом. Оказывается, молекулы состоят из самого различного количества атомов.

Что же такое атом? Как он выглядит, на что похож?

На целый ряд таких вопросов трудно ответить даже сейчас, когда наука о строении вещества достигла небывалого развития.

Строго говоря, вопрос о том, каков атом «по виду», попросту не имеет смысла. Дело в том, что атом не является чем-то стабильным, а все время меняется в очертаниях. Отдельные частицы, из которых он состоит, также движутся, беспрестанно изменяя свое взаимное положение.

Атомов различных видов сравнительно немного. Но образуют они бесчисленное количество разнообразных молекул. Молекулы могут отличаться не только своим составом, но и расположением в них атомов. Бывает, что одни и те же атомы, располагаясь по-разному, создают различные виды молекул. Вот, например, органические вещества—этиловый спирт и метиловый эфир. Их атомный состав одинаков. Однако располагаются атомы в их молекулах различно, поэтому и свойства этих веществ различны.

Ученые сумели взвесить атомы и молекулы. Разумеется, было бы неразумно выражать вес таких мельчайших частиц в обычных единицах — килограммах, граммах. Даже микрограмм был бы слишком велик для них. Миллиард молекул воды, например, весит лишь 30 миллиардных долей микрограмма.

Поэтому для новых частичек ввели новые единицы измерения: их сравнивали с самым легким элементом — водородом. Вес атома водорода был принят за единицу. Тогда атомные и молекулярные веса стали выражаться сравнительно небольшими числами. Позднее для измерения веса атомов ввели новую единицу, равную $^1/_{16}$ части веса атома кислорода.

Итак, во всех телах, окружающих нас, во всех предметах, какими бы неподвижными они ни казались, содержатся мириады мельчайших частиц, которые беспрестанно двигаются, изменяя свое положение. Все это скрыто от нас, но как бы мы удивились, если бы смогли рассмотреть то, что творится в каждой щепотке вещест-

ва, в каждой вещице, которую мы видим! Здесь кипит работа: молекулы и атомы непрерывно двигаются, перемещаются, сталкиваются и разлетаются во все стороны, чтобы через некоторое время снова встретиться и снова разойтись.

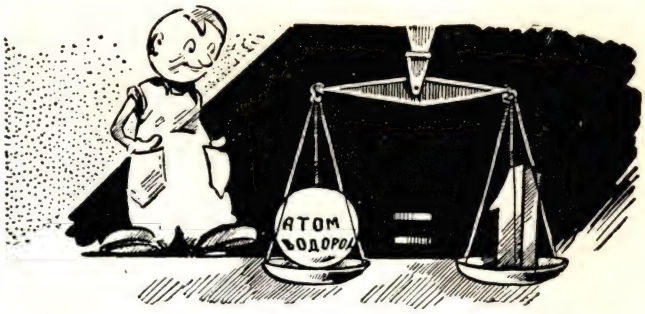
ЗАКОН МЕНДЕЛЕЕВА

В свое время казалось, что свойства различных элементов совершенно произвольны, беспорядочны и не подчиняются никаким законам. Многие ученые пытались систематизировать различные свойства элементов, но терпели неудачи. Гениальный русский ученый Д. И. Менделеев сумел выявить в их свойствах простые закономерности, показать, что они составляют стройную систему.

Оказалось, что надо расположить элементы по возрастанию их атомного веса. Тогда получится таблица, в которой различные свойства элементов будут периодически меняться. Более того, зная свойства одного элемента, можно предсказать свойства другого (подробнее об этом см. ст. «Периодический закон Д. И. Менделеева»).

Великий ученый был настолько уверен в правильности своей системы, что без всяких колебаний заявил: атомные веса некоторых элементов должны быть исправлены. Иначе они не попадали в те клетки таблицы, где должны были бы находиться, исходя из их свойств. И Менделеев оказался прав.

Подлинным его триумфом было открытие ранее неизвестных, но предсказанных им элементов. Французский ученый Буабодран открыл галлий, швед Л. Нильсон — скандий, а немец К. А. Винклер — германий. И все эти элементы оказались в тех самых местах периодической системы, куда их заранее поместил Менделеев, а все их



Атомная единица.

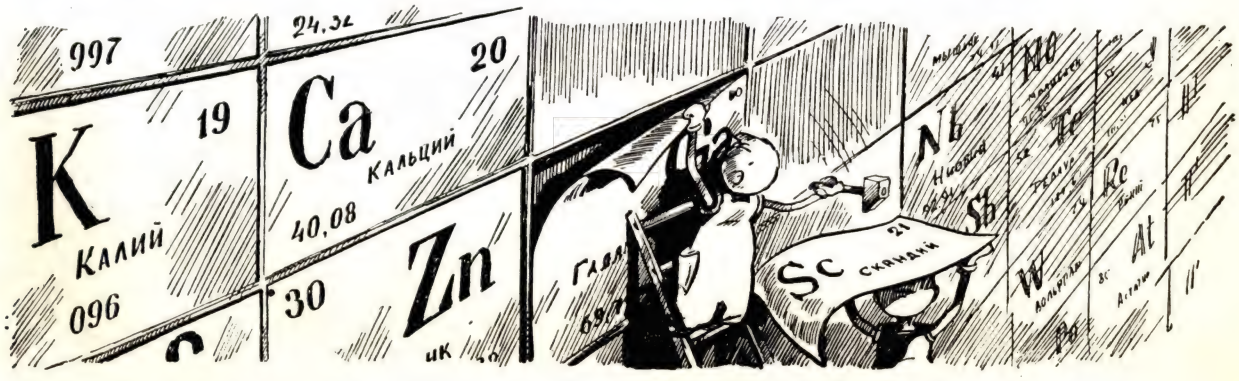
свойства были точно такими, как предсказал великий ученый.

Так была создана таблица элементов, глядя на которую можно было предсказывать свойства различных еще не открытых элементов и их соединений. Сами элементы казались незыблемыми, постоянными.

Но вот в конце XIX в. совершенно неожиданно оказалось, что один элемент ведет себя очень странно, непонятно. Случилось это так.

СЛУЧАЙНОЕ ОТКРЫТИЕ

Судьба различных открытий очень часто бывает самой неожиданной для современников. Французский физик Анри Беккерель по сути дела открыл новую область физики, его открытие явилось мощным толчком в развитии науки. А между тем многие ученые встретили его недоверчиво. Правда, это отчасти объясняется тем, что для обоснования открытых явлений приходилось жертвовать многими положениями физики, в том числе и такими, из которых к тому времени сложились ее основные принципы.



Элементы, предсказанные Менделеевым.

Открытие Беккереля.

И действительно, через 10 лет после первых работ Беккереля по стройному зданию классической физики пошли такие трещины, что последующие 20 лет были потрачены на его починку. В чем же состояло это открытие?

24 февраля 1896 г. на заседании французской Академии наук был зачитан первый доклад Беккереля об исследовании свечения различных веществ под действием солнечных лучей. Он интересовался фосфоресценцией — свечением, появляющимся после облучения солнечными лучами. Ряд веществ днем как бы накапливает солнечную энергию, а ночью выделяет накопленное в виде слабого свечения. (Подробнее об этом явлении можно прочитать в статье «Свет и его применение».)

Беккерель считал, что открытые незадолго перед тем рентгеновские лучи могут появляться как раз в результате фосфоресценции. Чтобы доказать это, он заворачивал фотопластинку в черную бумагу и помещал на нее исследуемые соли, в которых предполагал обнаружить интересующее его явление. Потом пластинку проявляли. Если на ней обнаруживались следы проникающего излучения, то дело становилось ясным: соль испускала рентгеновские лучи. Ведь черная бумага задерживает все другие лучи. Таким образом ученый исследовал соли калия и урана. Его опыты сначала шли удачно.

Но вот однажды в пасмурный день Беккерель приготовил все для опыта с солями урана, но из-за плохой погоды проводить его не стал. Он спрятал фотопластинку и помещенную на нее урановую соль в темный шкаф. Каково же было удивление Беккереля, когда на проявленной пластинке он заметил явственные следы излучения!

Они появились без солнца! Но как же это объяснить? Какое-то новое излучение урановой соли засвечивало пластинку.

Вновь и вновь ученый проводил опыты с различными солями и каждый раз убеждался, что излучение появляется во всех случаях, когда препарат содержит уран. Наконец, он испытал металлический порошок чистого урана.

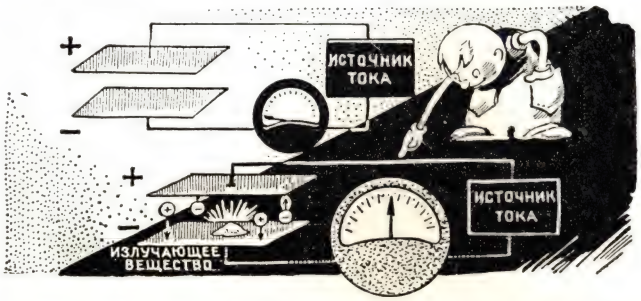
Опыт подтвердил его первоначальные предположения: чистый уран действовал на фотопластинку гораздо сильнее, чем любое его соединение.

Уран излучал какие-то лучи, проникавшие через непрозрачные предметы! Причем источник этого излучения лежал где-то в самом уране, так как он излучал в любых условиях.

Итак, Беккерель выяснил, что из солей урана излучались какие-то таинственные лучи, которые засвечивали тщательно завернутую фотопластинку. Воздух на их пути становился электропроводным. Под их действием светились зеленоватым светом экраны, покрытые сернистым цинком и некоторыми другими составами.

В РАБОТУ ВКЛЮЧАЮТСЯ СУПРУГИ КЮРИ

Все больше и больше ученых стали повторять опыты Анри Беккереля. Результаты их везде подтверждались. Многие ученые стали исследовать излучение солей урана.



Как обнаружить невидимое излучение, открытое Беккерелем.

Среди них особая роль принадлежит польскому физику Марии Кюри-Склодовской и ее мужу, известному французскому ученому профессору Пьеру Кюри. Собственно говоря, не умаляя значения открытия Анри Беккереля, следует сказать, что по-настоящему изучение радиоактивных веществ началось только после работ Марии и Пьера Кюри.

Это были подлинные подвижники науки. У них не хватало средств, чтобы пригласить себе лаборантов и помощников, они не могли даже нанять подсобных рабочих. И все, даже самую тяжелую и опасную работу, они делали сами. Редкое упорство и уверенность в правильности выбранного пути, понимание того, что в настоящей науке нет «чистой» и «грязной» работы, вели ученых к их великим открытиям.

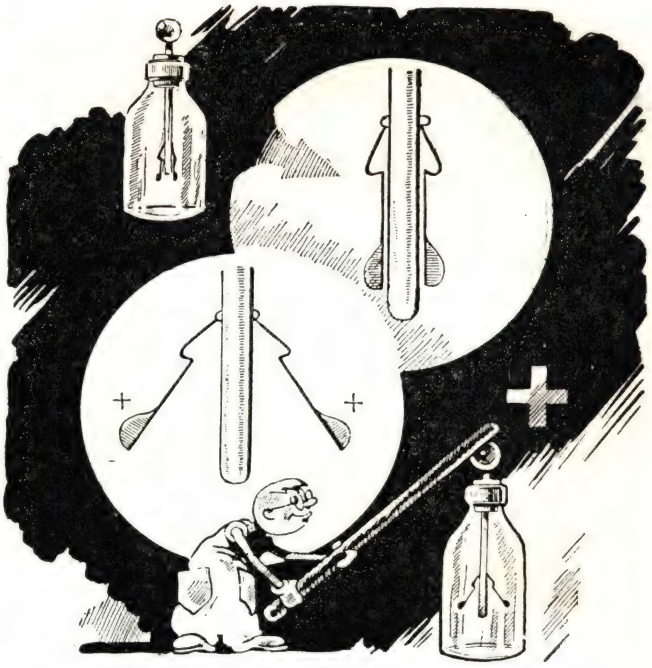
Первой начала работу Мария Склодовская. Пьер Кюри, незадолго перед тем получивший кафедру физики, был занят исследованием различных магнитных явлений. Мария Склодовская решила проверить, нет ли среди веществ, не исследованных Беккерелем, таких, которые обладают таинственными свойствами урана. Задача была не из легких. Пришлось перепробовать множество веществ.

Поиски велись с помощью элементарного прибора — электроскопа. Он исключительно нагляден, прост в изготовлении и обращении. Каждый может сделать его сам. Не мудрено, что с помощью этого простого прибора было сделано великое множество открытий.

На рисунке мы изобразили простейший электроскоп. Это стеклянная колба, в которую вставлен металлический стержень. Он проходит через пробку-изолятор. На стержне укреплены две полоски папиросной бумаги. Если его зарядить, то листочки разойдутся в разные стороны: ведь они одноименно заряжены. В зависимости от величины сообщенного им заряда листочки разойдутся больше или меньше. Поскольку воздух — изолятор, положение их не должно меняться. Но с течением времени они все же опадают, так как и через воздух стекают заряды.

А если воздух подвергнуть действию излучения? Тогда он становится проводником. Этим и воспользовалась Мария Склодовская. Она подносила к заряженному электроскопу различные минералы и смотрела, как себя ведут его листочки.

Долгое время успеха не было. Мария Склодовская исследовала все новые и новые вещества. И вот в апреле 1898 г. Академия наук услышала о новых открытиях. Лучи Беккереля



Электроскоп.

испускал еще один тяжелый металл — торий. Все его соединения и минералы, в состав которых он входил, отличались этой особенностью.

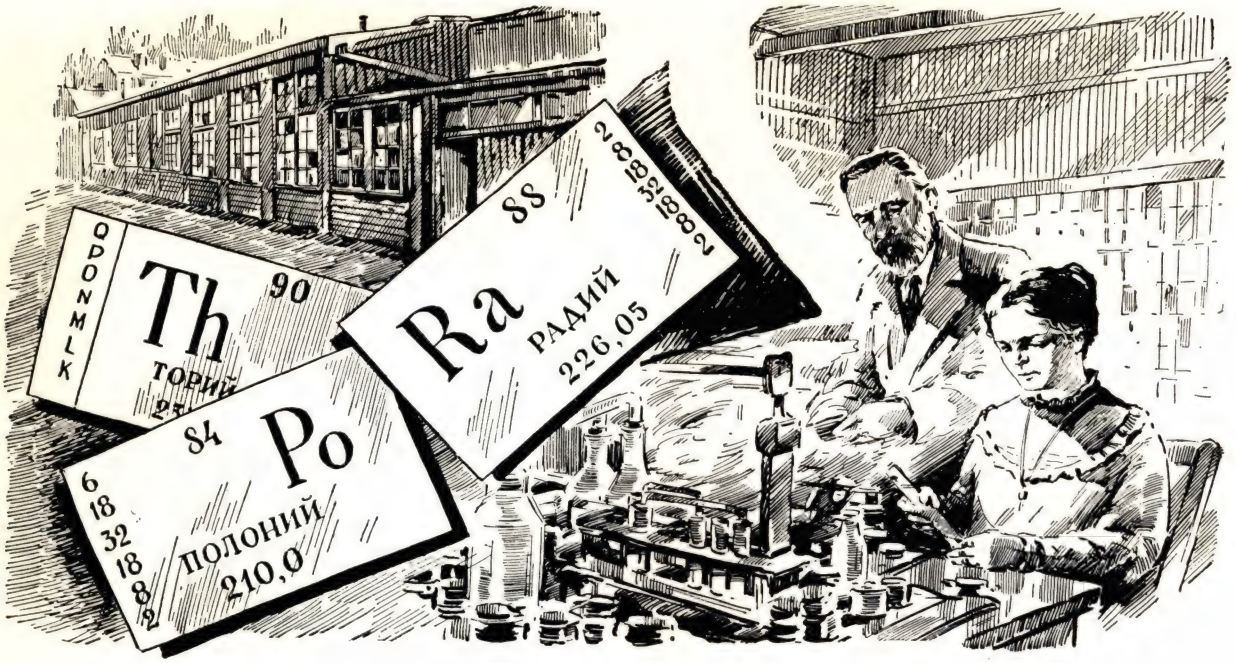
НОВЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ

Уран и торий были известны как элементы. Но на том же самом заседании Мария Склодовская указала, что два минерала, содержащие уран,— так называемая урановая смолка и халькoлит по своей активности превосходят чистый уран. Они быстрее заставляют опадать листочки электроскопа, быстрее и сильнее засвечивают фотопластинку. Очевидно, в этих минералах присутствуют какие-то более сильные, чем уран, излучатели. Так думала Мария Склодовская.

Но что же это за вещества? В числе известных тогда элементов их не было. Вот тут-то и началась поистине титаническая работа.

К счастью для науки, урановая руда после извлечения из нее урана считалась никому не нужным отходом. И фирма, занимавшаяся добычей урана, согласилась бесплатно передать Пьеру и Марии Кюри несколько тонн этих «отходов».

Началась работа, напоминающая поиски иголки в стоге сена. Но обнаружить и выделить новые излучающие вещества было, пожалуй,



Лаборатория Кюри.

потруднее, чем найти в сене иголку. Ведь иголка совсем не похожа на травинки. Поэтому стоит ее только увидеть, и уже всякие сомнения отпадают. А как отличить друг от друга атомы?

Несколько месяцев подряд изо дня в день, в праздники и воскресенья, Пьер и Мария Кюри растворяли урановую смолку, выделяя из нее различные вещества. И вот, наконец, они напали на след. Появились осадки, дающие излучение, хотя урана в них заведомо не было.

Теперь предстояло самое главное: надо было выяснить, что же за вещество этот новый излучатель. Для этого в раствор вводили различные соединения. В результате происходившей реакции появлялся нерастворимый осадок, в который выпадали соединения родственных элементов (лежащих в той же группе периодической системы Менделеева). Таким путем удается извлекать из раствора искомый элемент. И вот первая победа: крупинки нового, неизвестного элемента оказались в руках настойчивых ученых. Этот металл в честь родины Марии Кюри-Склодовской был назван полонием.

Но в растворе оставалась активность и тогда, когда из него был изъят весь полоний. Еще полгода упорного труда — и перед глазами ученых несколько крупинок хлористого соединения нового элемента, мощного излучателя — радия. Из раствора его извлекали с помощью металла бария.

Оба эти элемента заняли свои места в таблице элементов Менделеева. Полоний поместился рядом с висмутом, а радий — во второй группе, непосредственно под барием. По своим химическим свойствам радий был удивительно похож на барий.

От радия произошло и название — радиоактивные — для излучающих веществ, самое же явление излучения получило название радиоактивности.

Радий оказался исключительно активным. По данным Кюри, хлористые соединения этого металла были в 900 раз активнее аналогичных соединений урана.

Так в таблицу Менделеева были вписаны новые элементы, обнаружившие такие необычайные свойства. Все они попали в самый конец таблицы, замыкавшейся ураном. Но вот что особенно поразило ученых. Еще на заседании Академии наук Беккерель с удивлением сообщил, что за 72 часа излучение урановых солей не менялось по интенсивности, хотя он и держал их все это время в полной темноте. Это говорило о том, что извне энергия не поступала и в то же время непрерывно растрачивалась на излучение. Откуда же она бралась?

Наблюдая за поведением радиевых солей,

ученые заметили, что пробирка, в которой они находятся, на ощупь кажется теплее, чем окружающие тела. Пьер Кюри и французский ученый А. Лаборд произвели измерения и убедились, что это действительно так. Радиоактивные вещества выделяли теплоту! И, самое интересное, в отличие от всех других известных источников теплоты, они совершенно не менялись в весе. 136 *кал* теплоты в час выделяет 1 *г* радия. Откуда-то из недр вещества выделялась энергия, а само вещество практически оставалось неизменным.

ЛУЧИ В МАГНИТНОМ ПОЛЕ

Теперь уже радиоактивность заинтересовала всех. Сотни ученых в различных лабораториях мира работали над проблемами получения и очистки излучающих веществ, над изучением их свойств.

В этой области одно из первых мест принадлежит англичанину Эрнесту Резерфорду. Этот гениальный ученый и смелый экспериментатор умел предвидеть трудности и преодолевать их, умел предлагать новые теории и доказывать их правильность целой серией неожиданных и блестящих опытов.

Резерфорд задался целью не просто открывать новые излучающие вещества. Он хотел выяснить, что же представляют собой их лучи. Он правильно предположил, что в этих лучах могут встретиться заряженные частицы. А они отклоняются в магнитном поле. Поэтому Резерфорд пропустил сильный пучок лучей радия между полюсами мощного магнита. И его предположения оправдались.

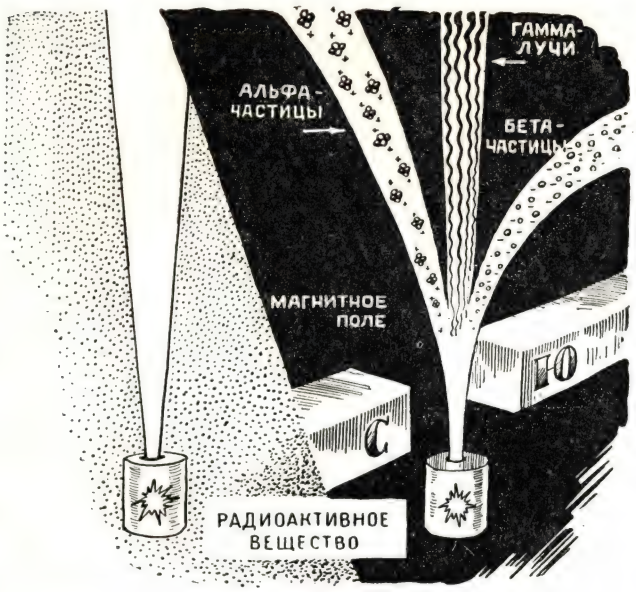
Излучение регистрировалось по действию на фотопластинку. Пока не было магнитного поля, на пластинке появлялось одно пятно от попадавших на нее лучей радия. Но вот пучок прошел через магнитное поле. Теперь он как бы распался на три части. Один луч отклонился влево, другой — вправо. И только слабенький третий луч не изменил своего направления. Что же произошло?

Отклонение лучей в магнитном поле ясно указало, что в состав излучения входят заряженные частицы; по этому отклонению можно было судить и о знаке частиц. По трем первым буквам греческого алфавита и назвал Резерфорд три составные части излучения радиоактивных веществ. Альфа-лучи (α) — часть излучения, отклонявшаяся, как отклонялись бы положительные частицы. Отрицательные частицы были обозначены буквой бета (β). А неотклонившаяся часть излучения получила название гамма-лучей (γ). Это, как оказалось, были «частицы» электромагнитного излучения — так называемые гамма-кванты (о том, что такое квант, см. на стр. 445).

КАК ОПОЗНАЛИ ЧАСТИЦЫ

Итак, исследования Резерфорда, к которому присоединился молодой талантливый физик Ф. Содди, показали, что вещества в процессе радиоактивного распада выбрасывают различные

Один грамм радия выделяет 136 кал теплоты в час. За шесть суток ее выделится достаточно для доведения до температуры кипения 200 Г воды.



Излучение в магнитном поле распалось на три части.

заряженные частицы. Что это за частицы? Знак их заряда, как мы уже говорили, определился по отклонению в магнитном поле. Но одного знака мало. Ученые хотели знать точно, какие же это частицы, что они собой представляют. Бета-лучи были определены сразу. Они оказались потоком очень быстрых электронов. А вот с альфа-частицами дело обстояло сложнее.

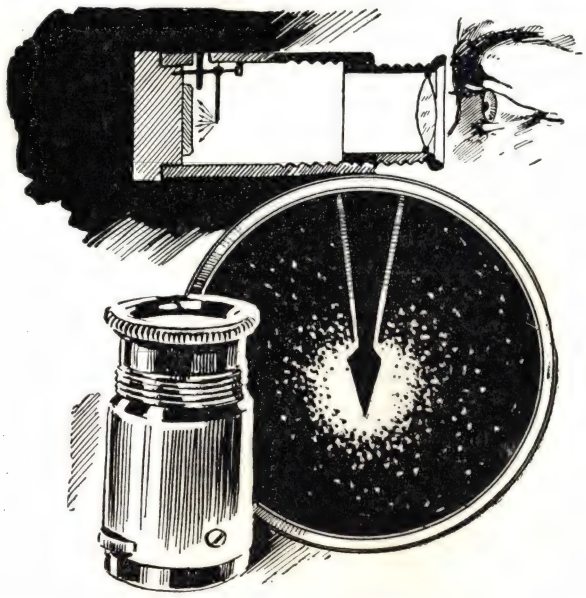
Английский ученый Дж. Томсон предложил интересный метод исследования заряженных частиц — ионов. Он пропускал пучок ионов через два поля — магнитное и электрическое. Они были расположены перпендикулярно друг к другу. Оказалось, что в этом случае отклонение частицы от первоначально прямолинейного направления зависит от отношения ее заряда к массе. Вот этот метод и применили к альфа-частицам.

Резерфорд и Содди открыли новый радиоактивный элемент — газ радон. Он оказался только альфа-излучателем. Этот элемент и послужил для получения альфа-частиц. Пропуская их по методу Томсона через поперечные — магнитное и электрическое — поля, ученые измерили отношение их заряда к массе, оказавшееся в два раза меньшим, чем у иона водорода.

Теперь оставалось определить отдельно величину заряда одной альфа-частицы, после чего несложный расчет дал бы исследователям ее массу.

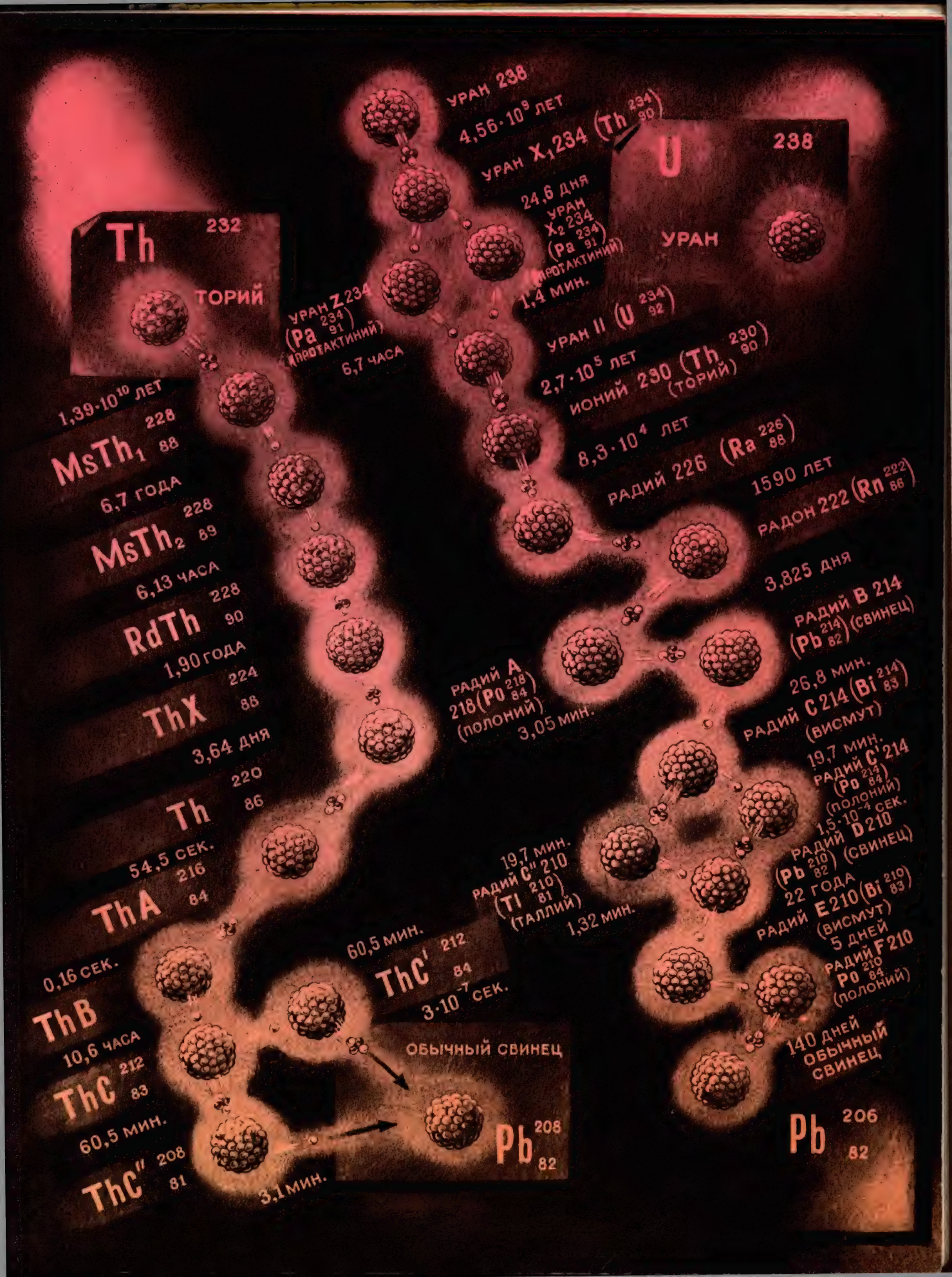
Английский ученый У. Крукс предложил своеобразный метод регистрации альфа-частиц. Мы уже говорили о том, что под действием солнечных лучей начинают светиться различные вещества. Крукс обнаружил, что эти вещества могут светиться и под действием заряженных частиц. Как только частица попадает на экран, покрытый таким веществом, на нем тотчас же вспыхивает яркая точка. Прибор для изучения заряженных частиц называется спинтарископом.

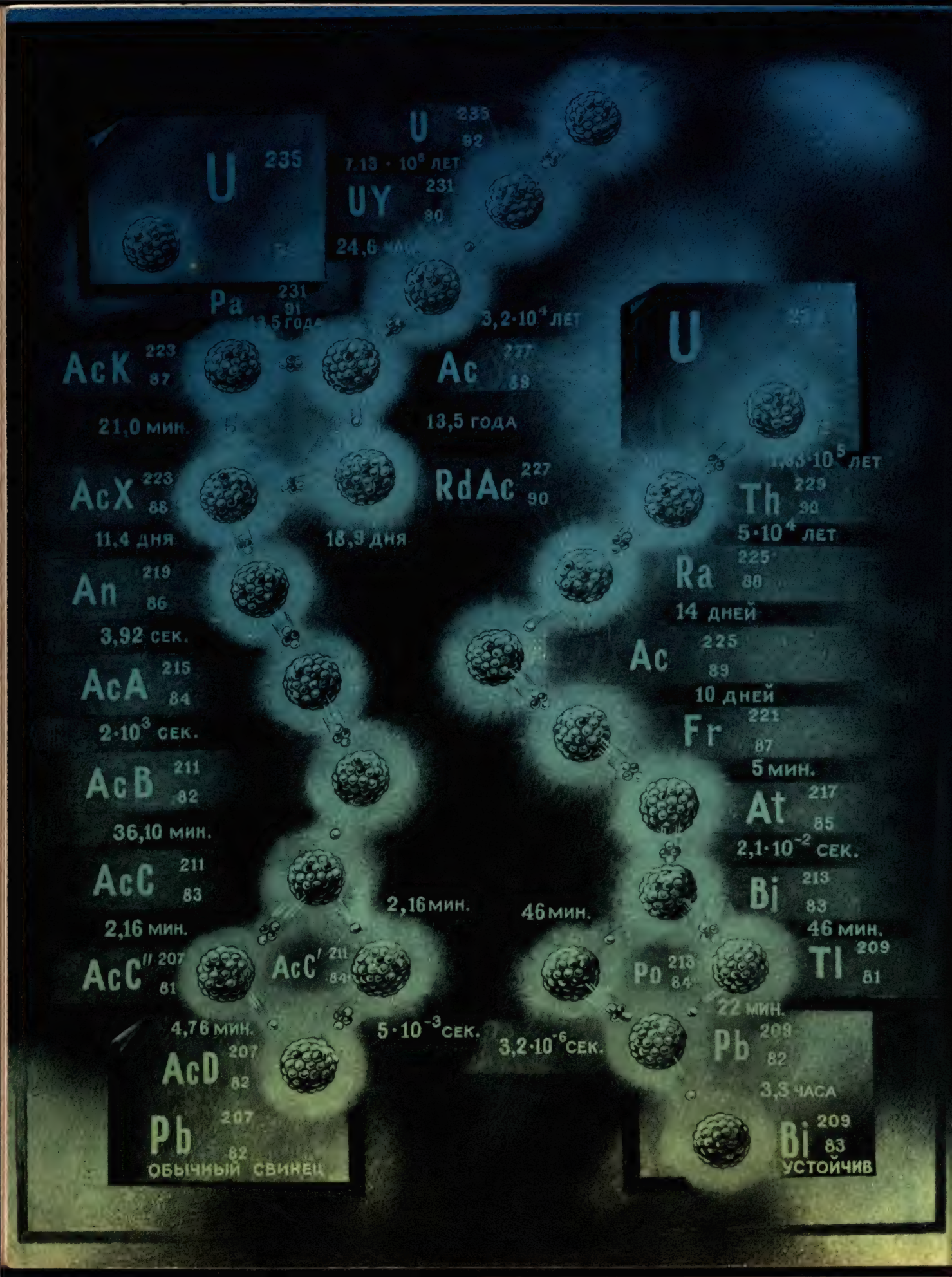
С помощью спинтарископа Крукса и измерили величину заряда одной альфа-частицы. Для этого его несколько усовершенствовали: к экрану было подключено устройство, с помощью которого можно было установить величину накопившегося на экране электрического заряда. После этого ученые сосчитали, сколько частиц попало на экран. Теперь уже легко было установить заряд одной альфа-частицы. Он оказался в два раза больше, чем у электрона. Но тогда масса альфа-частицы должна была равняться четырем, а это масса атома всем известного газа гелия. Значит, альфа-частицы — это лишенные двух



Спинтарископ Крукса.

Таблица 29. Слева — семейство радиоактивных элементов тория, справа — семейство радиоактивных элементов урана-238.


Th 232
ТОРИЙ
U 238
УРАН
УРАН 238
4,56·10^9 ЛЕТ
УРАН X1 234 (Th 234 90)
24,6 ДНЯ
УРАН X2 234 (Pa 234 91) (ПРОТАКТИНИЙ)
1,4 МИН.
УРАН Z 234 (Pa 234 91) (ПРОТАКТИНИЙ)
6,7 ЧАСА
УРАН II (U 234 92)
2,7·10^5 ЛЕТ
ИОНИЙ 230 (Th 230 90) (ТОРИЙ)
8,3·10^4 ЛЕТ
РАДИЙ 226 (Ra 226 88)
1590 ЛЕТ
РАДОН 222 (Rn 222 86)
3,825 ДНЯ
РАДИЙ B 214 (Pb 214 82) (СВИНЕЦ)
26,8 МИН.
РАДИЙ C 214 (Bi 214 83) (ВИСМУТ)
19,7 МИН.
РАДИЙ C' 214 (Po 214 84) (ПОЛОНИЙ)
1,5·10^-4 СЕК.
РАДИЙ D 210 (Pb 210 82) (СВИНЕЦ)
22 ГОДА
РАДИЙ E 210 (Bi 210 83) (ВИСМУТ)
5 ДНЕЙ
РАДИЙ F 210 Po 210 84 (ПОЛОНИЙ)
140 ДНЕЙ
ОБЫЧНЫЙ СВИНЕЦ
Pb 206 82
РАДИЙ A 218 (Po 218 84) (ПОЛОНИЙ)
3,05 МИН.
19,7 МИН.
РАДИЙ C'' 210 (Tl 210 81) (ТАЛЛИЙ)
1,32 МИН.
1,39·10^10 ЛЕТ
MsTh1 228 88
6,7 ГОДА
MsTh2 228 89
6,13 ЧАСА
RdTh 228 90
1,90 ГОДА
ThX 224 88
3,64 ДНЯ
Th 220 86
54,5 СЕК.
ThA 216 84
0,16 СЕК.
ThB
10,6 ЧАСА
ThC 212 83
60,5 МИН.
ThC'' 208 81
3,1 МИН.
60,5 МИН.
ThC' 212 84
3·10^-7 СЕК.
ОБЫЧНЫЙ СВИНЕЦ
Pb 208 82


U 235 92
7,13 · 10⁸ ЛЕТ
UY 231 90
24,6 ЧАС.
Pa 231 91
3,2·10⁴ ЛЕТ
AcK 223 87
21,0 МИН.
Ac 227 89
13,5 ГОДА
AcX 223 88
11,4 ДНЯ
RdAc 227 90
18,9 ДНЯ
An 219 86
3,92 СЕК.
AcA 215 84
2·10³ СЕК.
AcB 211 82
36,10 МИН.
AcC 211 83
2,16 МИН.
2,16 МИН.
46 МИН.
AcC'' 207 81
AcC' 211 84
4,76 МИН.
5·10⁻³ СЕК.
3,2·10⁻⁶ СЕК.
AcD 207 82
Pb 207 82
ОБЫЧНЫЙ СВИНЕЦ
U
Th 229 90
5·10⁴ ЛЕТ
Ra 225 88
14 ДНЕЙ
Ac 225 89
10 ДНЕЙ
Fr 221 87
5 МИН.
At 217 85
2,1·10⁻² СЕК.
Bi 213 83
46 МИН.
Tl 209 81
Po 213 84
22 МИН.
Pb 209 82
3,3 ЧАСА
Bi 209 83
УСТОЙЧИВ

электронов (дважды ионизированные) атомы гелия. Тут было чему удивляться! Выходило, что из некоторых радиоактивных веществ непрерывно вылетают атомы гелия. Но что же тогда остается? Как преобразуются атомы радиоактивных веществ?

ЗАКОНЫ РАСПАДА

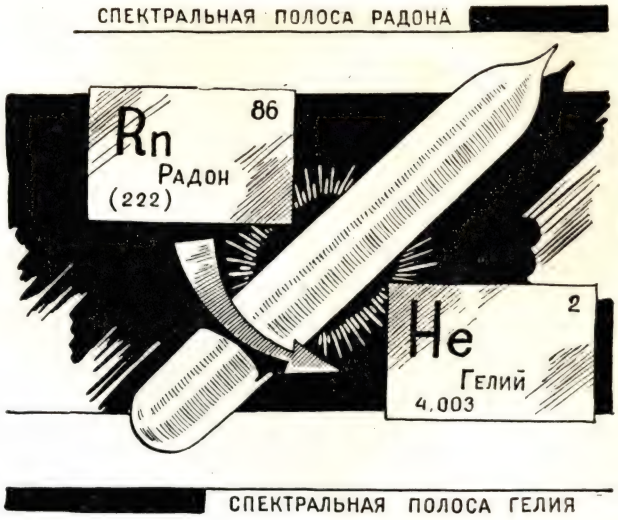
Резерфорд совместно с Содди и еще одним молодым ученым— Ройдзом начал исследование спектров радиоактивных веществ. Один из их опытов показал, что в запаянной пробирке, где находился радон, постепенно появлялась спектральная полоса гелия. А спектральные полосы радона так же постепенно ослабевали, что доказывало исчезновение этого газа. Но пробирка была запаяна. Куда же в таком случае мог исчезать радон? В другом опыте сквозь тонкое окошечко в сосуд, лишенный воздуха, впускали альфа-частицы. Спектроскоп показал, что в этом сосуде появился гелий, причем его количество постепенно увеличивалось.

Сомневаться было невозможно. Альфа-частицы оказались дважды ионизированными атомами гелия. А радиоактивные элементы могли с течением времени превращаться в какие-то другие элементы.

Ученые открывали новые радиоактивные элементы, изучали свойства альфа-, бета- и гамма-лучей, а основа всего — закон, по которому происходили явления распада, все еще не был найден. Но вот в 1903 г. Резерфорд и Содди предложили стройную теорию радиоактивного распада, которая объяснила все известные науке факты и привела их в четкую систему.

По этой теории, атомы радиоактивных веществ существенным образом отличаются от атомов обычных, нерадиоактивных. Это отличие состоит в том, что под действием каких-то неизвестных причин радиоактивные атомы могут самопроизвольно распадаться, выбрасывая или альфа-, или бета-частицы. Гамма-лучи сопровождают эти процессы.

Ученые выяснили, что в результате распада атомы радиоактивного вещества должны постепенно преобразовываться в атомы какого-то другого вещества. Этот новый элемент в свою очередь может быть радиоактивным.



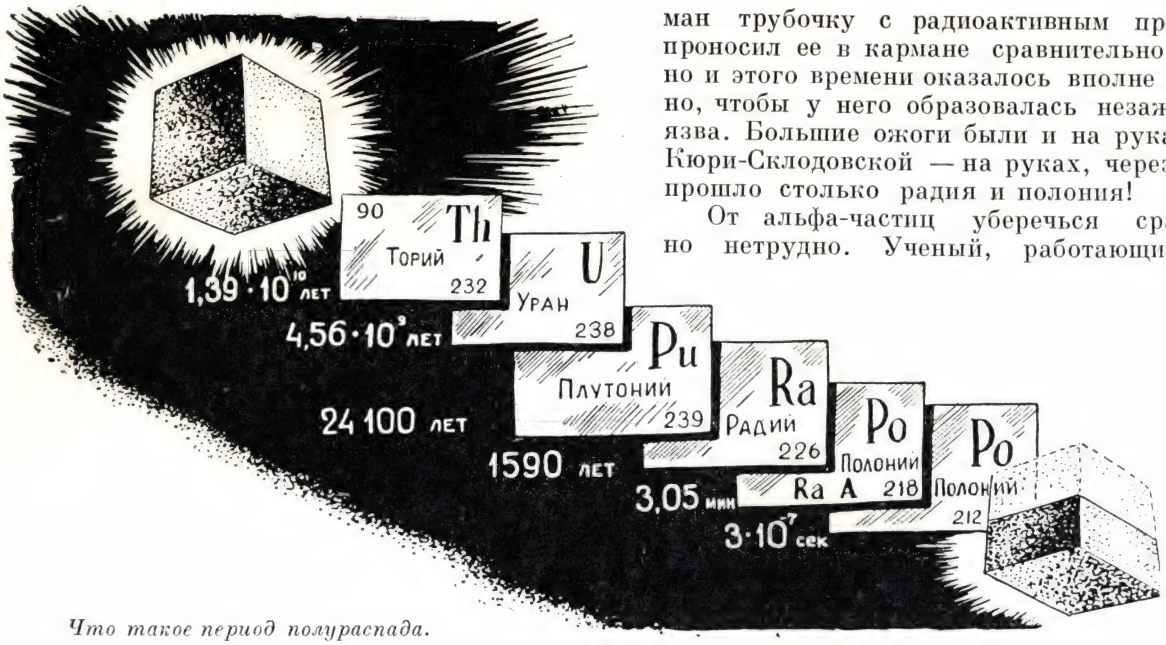
В пробирке с радоном появился гелий.

Отношение числа атомов данного вещества, распадающихся в единицу времени, к общему числу атомов Резерфорд назвал **постоянной распада** данного элемента. Грубо говоря, постоянная распада показывает, какая часть атомов радиоактивного вещества может распасться в ближайшее время. Но гораздо чаще пользуются другой величиной — так называемым **периодом полураспада**. Эта величина показывает, через какое время останется ровно половина атомов радиоактивного вещества. Разумеется, период полураспада связан с постоянной распада. Чем быстрее распадается вещество, т. е. чем больше постоянная распада, тем период меньше, и наоборот.

Исследования показали, что радиоактивные элементы могут иметь самые различные периоды полураспада — от десятимиллионных долей секунды до миллиардов лет. Но период полураспада для каждого данного вещества вполне определенный и изменить его не может ничто.

Пробовали подвергать радиоактивные элементы колоссальным давлениям, низким и высоким температурам — все равно точно за положенное время распадалась половина атомов упрямого элемента. Это было странным и удивительным — ведь ученые привыкли, что различные свойства вещества (плавление, кипение,

Таблица 30. Слева — семейство радиоактивных элементов урана-235, справа — семейство радиоактивных элементов урана-233.



Что такое период полураспада.

растворимость) можно изменять. А тут, как говорится, коса нашла на камень.

Это с несомненностью говорило о том, что таинственные превращения происходят где-то в самых глубинах вещества.

ТРИ ВИДА ЛУЧЕЙ

После открытия закономерностей радиоактивного распада полным ходом пошло изучение всех трех видов излучения.

Прежде всего их сравнили по степени ионизации воздуха и по тому, на какое расстояние они могут распространяться. Ведь все излучения ионизируют воздух, и он становится проводящим. При этом нейтральные молекулы воздуха превращаются в заряженные частицы — ионы, а энергия пролетающей частицы, или гамма-кванта, уменьшается за счет работы, которую они проделали, ионизировав молекулу воздуха.

Путь альфа-частицы в воздухе невелик. Задерживаются эти частицы очень легко — небольшого листка бумаги, не говоря уже о металле, достаточно для этого.

Мы не зря говорили о защите от радиоактивных веществ. Все виды излучения способны разрушать живые ткани в организме животных и человека. На них действует и альфа-, и бета-, и гамма-излучения. Первым человеком, пострадавшим от радиоактивных веществ, был сам Анри Беккерель. Однажды он положил в жилетный карман трубочку с радиоактивным препаратом, проносил ее в кармане сравнительно недолго, но и этого времени оказалось вполне достаточно, чтобы у него образовалась незаживающая язва. Большие ожоги были и на руках Марии Кюри-Склодовской — на руках, через которые прошло столько радия и полония!

От альфа-частиц уберечься сравнительно нетрудно. Ученый, работающий с открытыми альфа-препаратами, может защитить свои руки обычными резиновыми перчатками. Более проникающим является бета-излучение. Электроны, поставляемые атомами радиоактивных веществ, разлетаются во все стороны со скоростью, приближающейся к скорости света,— 300 000 *км/сек*! Энергии этих частиц, даже испускаемых каким-то одним радиоактивным веществом, самые различные. Но поглотить их труднее, чем альфа-частицы. Для этого резиновых перчаток уже недостаточно. Наиболее энергичные бета-частицы, долетающие к нам в составе космических лучей, обладают колоссальными энергиями. Они пронизывают сравнительно толстые пластинки металла.

Но самые проникающие — это гамма-лучи. Они легко проходят сквозь толстые стены или целые толщи металла. Тонны свинца и бетона окружают мощные источники гамма-лучей, чтобы задержать их смертоносное излучение.

РАСПАДАЮЩИЕСЯ СЕМЕЙСТВА

При радиоактивном распаде одни элементы получаются из других и в свою очередь распадаются сами. Образуется своеобразная цепочка, в которой последовательно стоят различные элементы, переходящие таким путем друг в друга.

Более того, если присутствует один из них, то обязательно есть или вскоре появляются и

другие члены многочисленного семейства. Поэтому даже самые недолговечные элементы существуют, пока не исчезнет их прародитель.

Ученые проделали очень интересный опыт. Из запаянной трубочки, в которой долгое время

Как задержать излучение.

находился кусочек радия, откачали воздух вместе с содержащимся в нем радоном. Естественно, активность кусочка радия упала. Но зато появился новый радиоактивный источник — трубочка, в которую перекачали радон. А затем активность этой второй трубочки начала уменьшаться: радон — весьма недолговечный элемент, период его полураспада 3,81 дня. Распадаясь, он превращается в так называемый радий-А. Однако в первой трубочке активность таким же темпом начала нарастать. В ней из имевшегося там радия стал образовываться новый радон. Период полураспада такого мощного излучателя, как радий, достаточно велик — 1590 лет. Вот почему Пьер Кюри не заметил уменьшения количества выделяемой радием теплоты.

Как только активность второй трубочки полностью исчезнет (а это произойдет примерно за 10 полупериодов, в данном случае — за 38 дней), активность первой трубочки восстановится полностью.

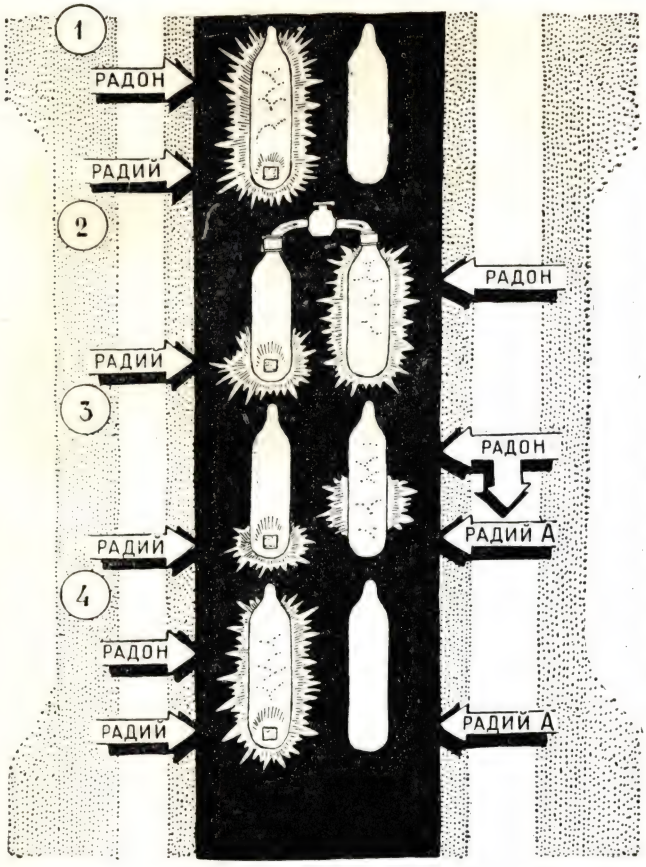
На цветных таблицах (стр. 512—513) изображены четыре нисходящие ломаные линии. Они изображают четыре радиоактивных семейства, какими мы их знаем сегодня. Первое, самое главное и известное, носит название ряда урана — радия. Уран, радий, радон, полоний — члены этого многочисленного семейства. Поэтому в составе излучения урана или радия так много различных частиц. Это — суммарное излучение всех членов такого радиоактивного семейства. На таблице вы видите, как через прихотливую цепочку альфа- и бета-распадов мы здесь доходим от урана до стабильного свинца.

Два других семейства — ряды тория и актиния. Можно сказать, что они похожи на семейство урана.

Четвертое радиоактивное семейство открыто совсем недавно. Оно содержит не только уже известные радиоактивные элементы, но и два новых — астатин и франций, которых никак не могли до этого найти. Когда их искусственно получили, стало ясно, почему это открытие не было сделано раньше. Дело в том, что франций обладает периодом полураспада всего 5 мин., а астатин и того меньше — 0,01 сек.

Вы, наверное, обратили внимание на то, что целый ряд элементов, входящих в состав этих семейств, обладает одним и тем же порядковым (атомным) номером по таблице Менделеева, но разными атомными весами. Такие атомы называются изотопами. Мы расскажем в дальнейшем о причинах их появления и о том, чем объясняется различие в их атомных весах и сходство в поведении и свойствах. (О применении радиоактивных изотопов см. статью «Меченые атомы» в т. 5 ДЭ.)

Итак, радиоактивные вещества распадаются, переходя одно в другое. Причины этого явления можно было узнать, только проникнув в глубь атома. Ведь распад как раз и показал, что атом — делимая частица. Надо было проникнуть в самые недра природы!



Рождение радона.

ВНУТРЬ АТОМА

Мы расскажем теперь об одном из самых волнующих экспериментов, которые были проведены в начале XX в.

В 1903 г., когда всем ученым стало ясно, что неделимости атома пришел конец, появилась первая модель атома.

Английский ученый Дж. Томсон предложил модель атома, согласно которой атом представляет собой шарик, который равномерно заполнен положительным зарядом, а внутри шарика расположены электроны. Их можно вырвать из него, тогда атом становится ионом. Число этих электронов полностью компенсирует суммарный положительный заряд атома. Колебания электронов происходят с определенными для данного атома, вернее для данного сорта атомов, частотами. А определенная частота — это определенный цвет, соответствующий линии в спектре элемента.

С этой стороны все как будто было гладко, но радиоактивность Томсон остерегался объяснять. Как распределена масса по шарику-атому, также оставалось неизвестным.

Для того чтобы проверить правильность этой теории, надо было заглянуть каким-нибудь образом в глубь атома. Грубая аппаратура того времени не позволяла поставить такой опыт. Решение нашел Эрнест Резерфорд, использовавший мельчайшие снаряды из всех когда-либо применявшихся человеком — альфа-частицы радиоактивных элементов. Ученый подвергал обстрелу этими частицами атомы различных элементов, чтобы таким путем выяснить их строение.

Так Резерфорд начал свои классические опыты по обстрелу альфа-частицами атомов металлов. И тут пошли неожиданности.

Прежде всего о самой постановке опыта. В ядерной физике, как, пожалуй, нигде, результаты зависят от правильной постановки и проведения опытов. Недаром ученые в своих отчетах столько времени уделяют подробнейшему описанию аппаратуры и методики проведения самого эксперимента.

Опыты Резерфорда были поставлены на редкость просто. На пути альфа-частиц помещалась тонкая металлическая фольга такой толщины, чтобы заведомо не задерживать их. Но в то же время частицы на своем пути должны были проходить через атомы металла и как-то взаимодействовать с ними. После фольги каждая частица попадала на экран из сернистого цинка, где давала вспышку.

Ученый ожидал, что, пройдя через содержащую огромное количество атомов металлическую фольгу, альфа-частицы сильно отклонятся от первоначального пути, полетят во все стороны... Но не тут-то было! Только одна частица из 8000 отклонялась на значительный угол. Остальные проходили, почти не отклонившись от первоначального направления.

Ученики Резерфорда — Гейгер и Мардсен проделали множество опытов, но все они давали в среднем одно и то же. Альфа-частицы не сталкивались на своем пути с атомами металлов, а проходили через них свободно. Но зато, когда это столкновение происходило, результаты его были такими, будто на пути частиц встретилась непреодолимая преграда. Эту преграду не могли создать отрицательные электроны. Ведь альфа-частица отбрасывалась обратно, а еще Кулон показал, что это может сделать только заряд, одноименный с ее зарядом, в данном случае положительный заряд какой-то части атома.

Исходя из больших углов отклонений альфа-частиц и редкости их столкновения с атомом, Резерфорд сделал вывод, что внутри, в самой глубине атома находится положительный заряд, связанный с массой атома. Он назвал эту часть атома ядром.

Резерфорд и его ученики проделали много опытов, в которых альфа-частицы отклонялись от своего пути в различных металлических фольгах, или, как говорят ученые, рассеивались атомами металла. Резерфорд даже рассчитал, на какой угол, в зависимости от массы соответствующего ядра атома, они должны рассеяться.

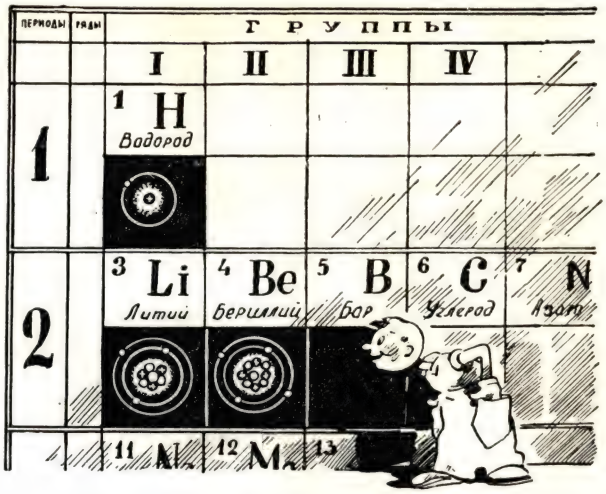
На основании отклонения альфа-частиц от прямого пути высчитывался заряд отклоняющих ядер. Но, когда частица пролетала очень близко от предполагаемого ядра атома, отклонение ее было не таким, каким оно должно было быть, исходя из формулы Резерфорда.

Из этого несовпадения ученый сделал интересный вывод. При выводе своей формулы он считал ядро точкой, т. е. не имеющей размеров частицей. Пока альфа-частица проходила далеко от ядра, с этим приближенно можно было согласиться.

Но вблизи ядра это было уже неверно. Отсюда Резерфорд и вычислил размеры ядра. Оказалось, что его поперечник должен быть в 100 000 раз меньше, чем поперечник всего атома. А если учесть, что размеры самого атома с обычной точки зрения уже исчезающе малы (ведь поперечник его во столько раз меньше поперечника горошины, во сколько раз сама эта горошина по поперечнику меньше расстояния от Москвы до Калинина), то станет ясно, какой малюткой должно быть атомное ядро.

По своей формуле Резерфорд определил заряды различных ядер. Эту работу продолжил один из его талантливейших сотрудников — Дж. Чедвик. С помощью исключительно точной установки он измерил заряды ядер различных металлов — золота, серебра, платины и меди.

Но когда ученые подсчитали эти величины, то оказалось, что они в точности равны порядковому номеру соответствующего металла в периодической системе элементов Менделеева. Таким образом, стало ясно, что «неделимый» атом в действительности представляет собой сложное образование, в центре которого находится положительно заряженное ядро с зарядом, равным порядковому номеру элемента в периодической системе. А электроны, видимо, окружают положительное ядро наподобие планет, обращающихся вокруг Солнца. Так возникла планетарная модель атома.



Атом в системе элементов Менделеева.

ОБЪЯСНЕНИЕ НИЛЬСА БОРА

Установленное Резерфордом представление об атоме сразу продвинуло вперед понимание его природы и позволило объяснить многие особенности, связанные с мельчайшими «кирпичиками» мироздания.

Однако и эта модель, как обычно бывает в науке, осветив ряд явлений, не смогла объяснить такой существенный факт, как хорошо известная ученым устойчивость атома. Действительно, уже тогда было хорошо известно, что электрический заряд, электрон, не может долго вращаться вокруг ядра. Такое движение заряда возбуждает электромагнитные волны, которые в случае движения электрона в атоме воспринимались бы как ультрафиолетовый свет. Однако излучение света связано с расходованием энергии движущегося электрона. В результате через малое время электрон должен был бы упасть на ядро и остановиться. Ничего подобного, однако, не наблюдается.

Много было сделано попыток объяснить устойчивость атома на базе хорошо известных из практики физических законов, однако ни одна из них не завершилась удачей. И только в 1913 г. датчанину Нильсу Бору удалось решить эту задачу. Но для этого ему пришлось отказаться от обычных, как говорят, «классических», представлений о характере явлений внутри атома — представлений, основанных на опыте с телами, неизмеримо бо́льшими, чем атом. Оказалось, что атом только внешне похож на планетную систему. Но вместе с умень-

шением размеров меняются и основные управляющие им физические законы, и нельзя механически применять к такому маленькому объекту законы, установленные для больших тел.

Впервые на такие новые физические закономерности обратил внимание немецкий физик Планк. Он установил на основе эксперимента закон теплового излучения нагретого тела. При этом он столкнулся с тем, что излучение имеет прерывный характер. Планк смог обосновать свой закон лишь с помощью замечательного предположения, что энергия колебания атомов не произвольная, а может принимать лишь ряд вполне определенных значений. Позднейшие исследования целиком подтвердили это предположение. Оказалось, что прерывность присуща любому излучению, что свет состоит из отдельных порций — к в а н т о в — энергии (см. стр. 455).

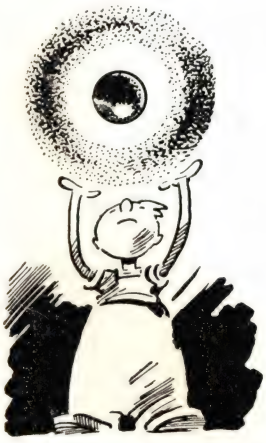
Планк установил, что свет с частотой колебания ν должен испускаться и поглощаться порциями, причем энергия каждой такой порции, энергия кванта, связана с частотой соотношением

$$E = h\nu.$$

Постоянная величина h называется теперь п о с т о я н н о й П л а н к а. Она равна $(6{,}62377 \pm 0{,}00018) \cdot 10^{-27}$ *эрг·сек*.

Бор применил идею о прерывности излучения энергии к атомным явлениям, предположив, что атом может сколь угодно долго пребывать в определенных, устойчивых состояниях, не излучая энергии. Каждое такое состояние связано с определенным характером движения электрона — с его орбитой.

На такой устойчивой орбите электрон имеет постоянную энергию, не меняющуюся со временем. Энергия его меняется только при «перескоке» с одной орбиты на другую. При этом излучается квант энергии, равный разности энергии на начальной и конечной орбитах электрона. Частота испускаемого света определяется, из соотношения Планка, по энергии кванта. Так как атом каждого химического элемента имеет свои, характерные для него орбиты электронов, то свет, испускаемый этим атомом, будет иметь частоты, свойственные только этому атому.



Модель атома водорода.

Таким образом, зная частоты света, испущенного атомом,— его спектр, можно узнать, какой атом испустил этот свет. На этом основана целая отрасль науки — спектральный химический анализ.

Теория Бора позволила объяснить большое количество опытных фактов, которые были абсолютно непонятны с точки зрения старой, «классической» физики.

ПРЕОБРАЗОВАНИЕ ЭЛЕМЕНТОВ

Начавшаяся первая мировая война отвлекла ученых от исследования атомного ядра, которое казалось тогда лишенным какого бы то ни было практического значения. Вернулись к нему только в 1919 г., когда все тот же Эрнест Резерфорд поставил опыты, которые снова приковали внимание всего мира к лаборатории, где изучают самые непонятные явления.

Здесь человеком впервые было достигнуто преобразование элементов. Ведь до сих пор человек умел только получать различные соединения элементов или разлагать их на составные части. Да и то некоторые из элементов, как например инертные газы (гелий, неон, аргон, криптон и ксенон), никак не поддавались воздействию и не вступали в соединения. Но сами элементы оставались незыблемыми, каким бы испытаниям их ни подвергали.

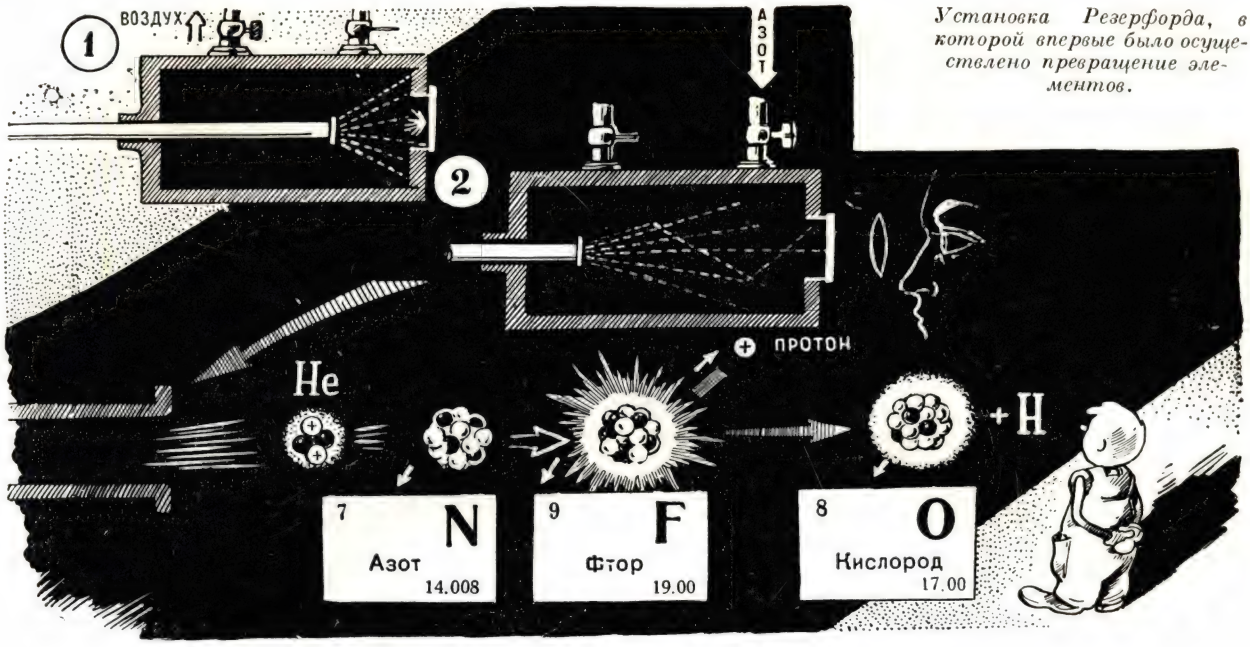
Мечты средневековых алхимиков давно подверглись осмеянию. Считалось доказанным, что только люди, ничего не смыслящие в науке, могут думать о возможности получения золота из других элементов.

И вдруг нашелся такой человек, который не только предположил возможность таких превращений, но и доказал эту возможность самым наглядным способом.

Конечно, не следует думать, что Резерфорд в тиши лаборатории действительно получил кусок золота из свинца или другого металла, а потом торжествующе показал его изумленным зрителям.

Нет! Увидеть полученные элементы было нелегко, для этого надо было пользоваться сложным оборудованием. Но важен был сам факт активного вмешательства человека в до сих пор недоступную ему сферу — внутриатомное пространство.

Резерфорд теперь попытался не только изучить строение ядра. Его сейчас интересовало



Установка Резерфорда, в которой впервые было осуществлено превращение элементов.

совсем другое. Он хотел «ворваться» в этот мир и попробовать оторвать от ядра одну или несколько составляющих его частиц, переделать ядро атома.

И это закончилось триумфом науки!

При помощи самых элементарных приспособлений ученый начал исследования взаимодействия альфа-частиц с ядрами.

Современным ученым, обладающим великолепно оборудованными лабораториями, порой просто трудно себе представить, с помощью какого примитивного оборудования ставил Резерфорд свои замечательные опыты. Великий физик всегда подчеркивал, как важно для ученого умение правильно провести эксперимент. И великолепные результаты его опытов во многом объясняются умением тщательно подготовить эксперимент, умением создать нужную аппаратуру.

Установка Резерфорда состояла из источника альфа-частиц (осадок радия-В на металлической пластинке) и регистратора этих частиц — флуоресцирующего экрана. С его помощью можно было отличать различные частицы одну от другой: в зависимости от величины их заряда и энергии яркость вспышки на экране менялась.

Все это устройство было помещено в сосуд с чистым воздухом.

Пока давление газа в сосуде было невелико, экран весело вспыхивал голубыми точками: альфа-частицы бомбардировали его поверхность. Но вот давление газа увеличилось, пробег альфа-частиц уменьшился и вспышки пропали: частицы не долетали до экрана. Ярких вспышек не было.

Но зато иногда на экране стали появляться бледные вспышки. Их было немного, но они упрямо вспыхивали то там, то здесь. Они были точно такими же, как вспышки от падения на экран ядер водорода — протонов.

Результат был ошеломляющим. «Откуда взялись протоны?» — недоумевали ученые. Их недоумение было вполне понятным: налицо было новое явление. Ведь протонов заведомо не могло быть внутри трубки, в которой шел опыт. Значит, в результате взаимодействия ядер гелия и ядер атомов какого-то из газов, составляющих воздух, появились протоны. Опыты Резерфорда были повторены в десятках лабораторий.

С помощью очень тонкой методики ученые доказали, что в воздухе действительно происходит ядерная реакция. Участвуют в ней ядра азота.

В особом устройстве — камере Вильсона — были получены снимки, на которых было отчетливо видно, как альфа-частица затормаживается и от этого места расходятся следы двух частиц — протона и ядра, образовавшихся в результате реакции.

Какой же элемент образуется в результате

этого взаимодействия? Атомный вес азота — 14, а гелия — 4. Суммарный заряд их ядер — 9. Вылетает протон, обладающий единичными массой и зарядом. Значит, остается 8 единиц заряда и 17 единиц массы. Короче говоря, появится разновидность (изотоп) кислорода с атомным весом 17. Эту реакцию можно записать таким образом:

$$N_7^{14} + He_2^4 \rightarrow O_8^{17} + H_1^1.$$

Мы и впредь будем так же вести запись различных ядерных реакций, которые нам предстоит рассмотреть. Возле химического символа соответствующего элемента справа внизу записан номер элемента, определяемый зарядом ядра, а справа вверху — массовое число, соответствующее атомному весу данного изотопа.

УДАР ПО ЯДРАМ АТОМОВ

Открытие Резерфорда окрылило физиков. Множество лабораторий начало серию опытов по бомбардировке ядер заряженными частицами. Успех опытов в очень сильной степени зависел от энергии бомбардирующих частиц. Но как ее повысить?

Пока пользовались природными источниками, ничего нельзя было добавить к скорости частиц. Любой радиоактивный элемент давал частицы определенной энергии, притом не очень-то большой.

И начались поиски способов ускорения частиц. Всем стало ясно, что преобразование ядер — будущее науки. Столь же ясным было и другое: пока исследователи не научатся ускорять частицы, они не добьются серьезных результатов.

Уже в 1932 г. английским ученым Д. Д. Кокрофту и Э. Уолтону удалось получить ядра водорода — протоны большой по тому времени энергии.

С помощью этих ускоренных протонов Кокрофт и Уолтон сделали еще одно важное для физики открытие.

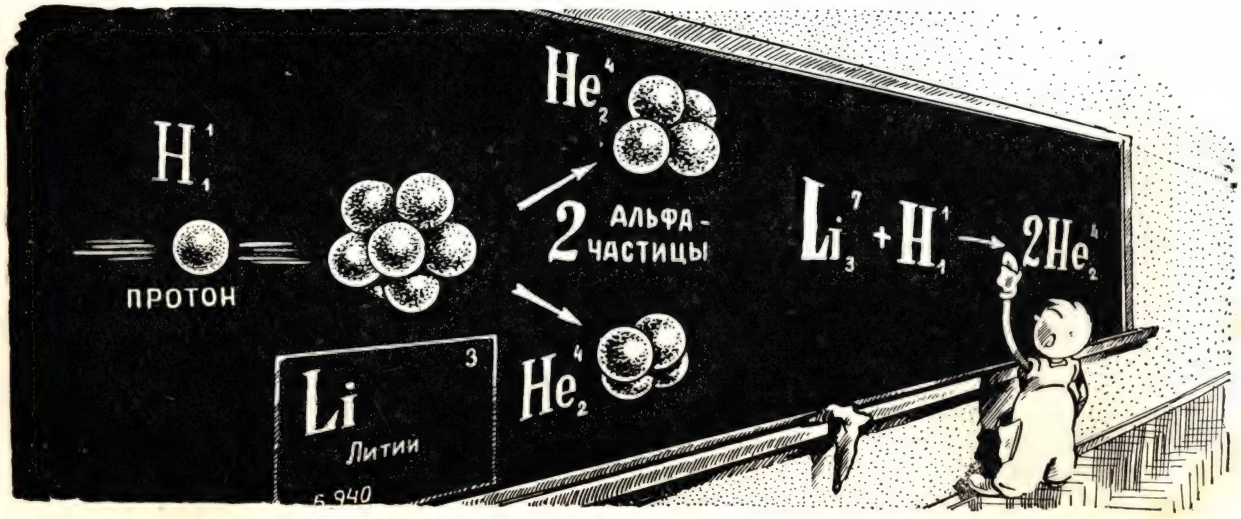
При бомбардировке ускоренными протонами ядер лития наблюдалось испускание двух альфа-частиц. Эта реакция может быть записана таким образом:

$$Li_3^7 + H_1^1 \rightarrow 2He_2^4.$$

Казалось бы, ничего удивительного здесь нет. Но, пожалуй, узнав об этой реакции, человечество впервые всерьез подумало о возможности использования колоссальной внутриядерной энергии. Дело в том, что в результате этой реакции выделялось большое количество энергии.

Но зачем ускорять частицы, зачем повышать их энергию? Разве без этого не могут происходить различные ядерные реакции?

Происходить-то они, конечно, могут. Но дело вот в чем. Летит заряженная частица к атому, к его ядру. Допустим, «нацелились» мы прекрасно, «снаряд» послан точно в цель. Но лишь только подлетит он к ней ближе, как сразу же сворачивает в сторону, огибает ядро, как будто ядро специально отводит в сторону все снаряды, посылаемые учеными, не желает реагировать с различными частицами.



Ускоренные протоны рождают две альфа-частицы.

Ядро атома имеет мощный защитный барьер — заряд ядра. Ну да! Ядро ведь обладает положительным зарядом, тем же самым, какой имели ядерные снаряды, которые в то время находились в распоряжении ученых (электроны тогда не использовались в «атомной артиллерии» — попадание электрона в ядро не способно вызвать его распад).

Мощный защитный барьер атомного ядра — его заряд.

И вот, как только подлетит такая положительно заряженная частица к ядру, сразу же проявляются мощные силы отталкивания. Чем ближе друг к другу подходят частицы, тем больше силы отталкивания. Чем больше энергия частицы, тем ближе сможет она «пробиться» к ядру атома. А на очень близких расстояниях, у самого ядра, происходит нечто удивительное. То самое ядро, которое только что так противилось приближению частицы, вдруг становится гостеприимным хозяином! На очень близких расстояниях начинают действовать ядерные силы. Они-то и втягивают частицу в ядро.

Значит, надо разогнать частицу до такой скорости, чтобы заряд ядра не смог отбросить ее в сторону, пока она не приблизится к ядру вплотную. А там уж ядерные силы втянут частицу внутрь.

НЕОБЫКНОВЕННЫЕ ЧАСТИЦЫ

Пока развивалась «ядерная артиллерия», пока совершенствовались ускорители, ученые, разумеется, не теряли время даром. Они изучали взаимодействие частиц и ядер с помощью уже известных методов.

Но на первых порах типы «ядерных снарядов» были очень ограниченны. Практически использовали только альфа-частицы. Ведь первые ускорители появились лишь в 1932 г., а источники альфа-частиц давно были под рукой.

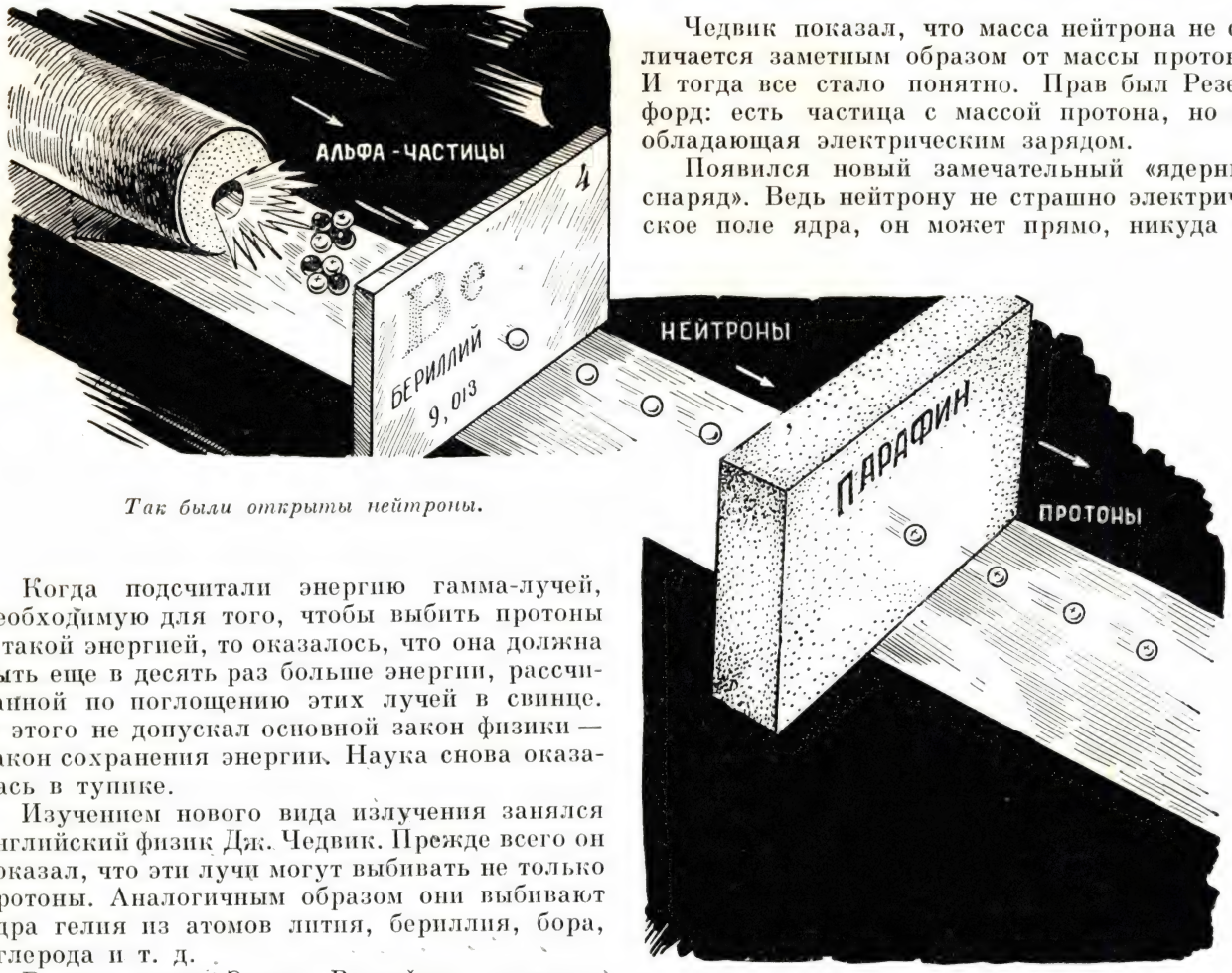
И, по сути дела, изучалась одна единственная ядерная реакция — ядро поглощало альфа-частицу и испускало протон. А энергии всех остальных частиц попросту не хватало для того, чтобы началась какая-нибудь ядерная реакция. В первую очередь обстрелу подверглись все легкие элементы. Это и понятно: у них заряд ядра меньше, значит, и силы отталкивания меньше, значит, альфа-частица скорее сможет разбить такое легкое ядро. И все легкие элементы при такой бомбардировке испускали протоны.

В 1930 г. немецкие физики В. Бете и Г. Беккер заметили, что два легких элемента — литий и бериллий этому правилу не подчиняются. Они не испускают протонов под действием альфа-частиц. Ученые много раз повторяли опыты и каждый раз убеждались в том, что протонов при этом не появляется. Одновременно они обратили внимание на то, что при этой реакции литий и бериллий начинают что-то излучать. Аналогичное излучение давал еще один подвергнутый альфа-бомбардировке легкий элемент — бор. Излучение это не могли задержать мощные экраны, почти полностью поглощавшие даже самые проникающие — жесткие гамма-лучи.

Это было совсем странно. Самые жесткие гамма-лучи от известных в то время радиоактивных источников — гамма-лучи тория-С — наполовину поглощались слоем свинца в 1,5 *см*. А для бериллиевого излучения эта величина составляла ни много ни мало — 5 *см*!

Исследователи пришли к выводу, что вновь открытое излучение должно содержать гамма-лучи колоссальной энергии. Это вызвало удивление. Многие ученые утверждали, что появление гамма-лучей такой энергии невозможно.

Замечательные французские ученые Фредерик Жолио и Ирэн Кюри произвели опыты, которые показали, что ядра легких элементов под действием альфа-частиц не могут испускать такое мощное гамма-излучение. Ученые доказали, что предполагаемые гамма-лучи вели себя совсем необычно. Они выбивали из парафина содержащиеся в нем ядра водорода — протоны, причем пробег последних был очень большим.



Так были открыты нейтроны.

Когда подсчитали энергию гамма-лучей, необходимую для того, чтобы выбить протоны с такой энергией, то оказалось, что она должна быть еще в десять раз больше энергии, рассчитанной по поглощению этих лучей в свинце. А этого не допускал основной закон физики — закон сохранения энергии. Наука снова оказалась в тупике.

Изучением нового вида излучения занялся английский физик Дж. Чедвик. Прежде всего он доказал, что эти лучи могут выбивать не только протоны. Аналогичным образом они выбивают ядра гелия из атомов лития, бериллия, бора, углерода и т. д.

В свое время Эрнест Резерфорд высказал чрезвычайно смелую мысль. В нашем советском журнале «Успехи физических наук» в 1921 г. появилась его статья. Он высказал предположение, что существует ядерная частица, масса которой равна массе протона, а заряд отсутствует. Начавший в то время свои опыты по «современной алхимии» Резерфорд мечтал об этой новой частице. Он говорил: «Подобный атом обладал бы совершенно фантастическими свойствами... Он должен обладать способностью свободно проходить через материю...»

И многие годы великий ученый потратил на поиски этой таинственной частицы. Но ни он, ни его помощники так и не нашли ее, потому что искали совсем не там, где она могла находиться.

А вот Бете и Беккер и Жолио-Кюри, а за ними Чедвик действительно обнаружили эту частицу. Нейтрон был открыт.

Именно нейтроны вылетали из ядер бериллия, обстреливаемых альфа-частицами.

Чедвик показал, что масса нейтрона не отличается заметным образом от массы протона. И тогда все стало понятно. Прав был Резерфорд: есть частица с массой протона, но не обладающая электрическим зарядом.

Появился новый замечательный «ядерный снаряд». Ведь нейтрону не страшно электрическое поле ядра, он может прямо, никуда не сворачивая, лететь к цели. Необыкновенная частица помогла людям подобрать ключи к кладовым внутриядерной энергии.

СТРОЕНИЕ ЯДРА

Открытие нейтрона очень помогло физикам-теоретикам.

В 1932 г. советские ученые Е. Н. Гапон и Д. Д. Иваненко и параллельно с ними немецкий физик Гайзенберг предложили очень простую картину строения ядер различных атомов, которая удовлетворительно объяснила все непонятное, что было связано с частицами, входящими в состав атомного ядра.

По этой теории, все ядра состоят из двух видов частиц — протонов и нейтронов. Число протонов соответствует атомному номеру элемента, а разница между атомным весом и по-

рядковым номером является как раз числом нейтронов в этом ядре.

Но как тогда объяснить явление бета-распада? Откуда в ядре появляются электроны? Вопросы вполне резонные. И тут выяснилось: электроны образуются в ядре.

И бета-распад можно представить себе таким образом, что в одном каком-нибудь ядре нейтрон превращается в протон. При этом появляется электрон, который не может остаться в ядре. Он и вылетает наружу в виде бета-частицы.

У нуклона два состояния.

Возможен и обратный процесс: протон захватит электрон и превратится в нейтрон. В результате такой реакции атомный номер должен на единицу уменьшиться. Процесс этот называется *К*-захватом.

Но откуда же протон может захватить электрон? Ближе всего к ядру находятся электроны внутренней оболочки атома. С нее-то и происходит этот захват.

Иногда ядра выбрасывают положительные электроны, называемые позитронами. И позитронный распад также легко объяснить. Протон при этом превращается в нейтрон. И ядро выделяет уже не отрицательный, а положительный электрон.

Модель атома бериллия.

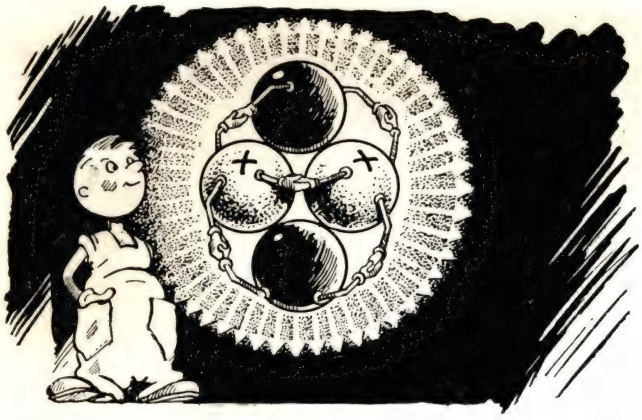
При всех этих процессах происходят превращения протона в нейтрон или наоборот. Масса частицы при этом почти не меняется. Поэтому иногда удобно протоны и нейтроны называть н у к л о н а м и и считать, что нуклоны могут существовать внутри атомного ядра в двух состояниях — протонном и нейтронном. Переход одного из этих состояний в другое всегда сопровождается испусканием или поглощением обычных электронов или электронов с положительным зарядом — позитронов.

Все химические свойства элемента связаны с его положительным зарядом. А различные разновидности атомов элемента — изотопы — отличаются только числом нейтронов.

ЯДЕРНЫЕ СИЛЫ

Как только стало ясно, из каких частиц состоит атомное ядро, возникла новая задача. Теперь надо было объяснить, почему протоны и нейтроны удерживаются в ядрах атомов и что держит там эти маленькие частички материи.

Особенно непонятно поведение протонов. Как известно, частицы с одинаковым электрическим зарядом отталкиваются. Почему же протоны не разлетаются в разные стороны? Чем они так крепко связаны в ядре? Что их там держит? И вообще, что представляют собой ядерные



Ядерные силы действуют на очень малых расстояниях от ядра.

силы, удерживающие частицы вместе, создающие такую компактную массу, как атомное ядро?

Ядерные силы действуют только на очень малых расстояниях от ядра атома (сравнимых с диаметром ядра). Вдалеке от него их действие совершенно не ощутимо. Кроме того, эти силы действуют между всеми частицами, образующими ядро: и между нейтроном и протоном, и между двумя нейтронами, и между двумя протонами.

Теории ядерных сил, четкой и ясной, не существует еще и сейчас. Очень многое непонятно. Характер ядерных сил определен только приближенно. Создание законченной теории ядерных сил — дело будущего.

РАДИОАКТИВНОСТЬ ВЫЗВАНА ЧЕЛОВЕКОМ

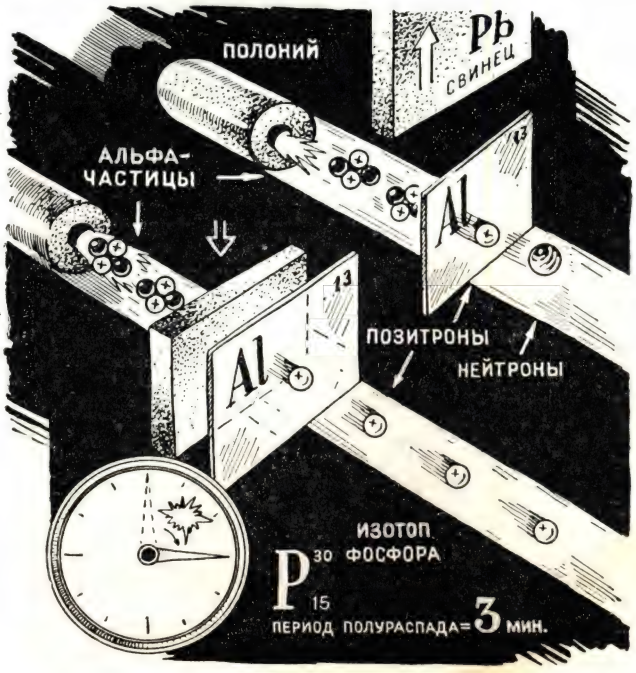
Открытие нейтронов создало новую эру в физике ядра. Буквально все лаборатории, где изучалось строение вещества, прямо-таки «набросились» на нейтрон. И замечательные открытия посыпались, как из рога изобилия. Самым замечательным из них было, без сомнения, открытие искусственной радиоактивности. Произошло это следующим образом.

Ирен и Фредерик Жолио-Кюри, как и многие ученые, начали изучение взаимодействия легких элементов с альфа-частицами. Они наблюдали излучение нейтронов. В числе других элементов молодые физики подвергали бомбардировке алюминий. При этом, как и следовало ожидать, выделялись нейтроны. Но вместе с нейтронами алюминий испускал какие-то легкие частицы. По отклонению в магнитном поле выяснили, что это — позитроны. Это был первый случай, когда позитроны были обнаружены в лаборатории. До этого считали, что они образуются только в космических лучах.

Уже само по себе это было открытием. Но самое интересное было в другом. Нейтронное излучение легких элементов пропадало, как только их переставали обстреливать альфа-частицами. Это было вполне естественно и не вызывало никаких сомнений. Откуда бы взяться нейтронам в отсутствие альфа-частиц?

Но вот алюминий, испускающий под действием альфа-частиц нейтроны и позитроны, отделили от источника альфа-частиц (в опытах Жолио-Кюри им был препарат полония) специальным экраном. Излучение нейтронов немедленно прекратилось. А позитроны продолжали выделяться. С течением времени их выделение заметно уменьшалось. Через некоторое время оно совсем исчезло. Ученые повторили опыт. Они убедились, что под действием альфа-частиц полония в алюминии образовалось какое-то вещество, испускающее позитроны. Период полураспада этого вещества оказался равным 3 мин.

Тогда супруги Жолио-Кюри начали наблюдать, не излучают ли позитроны и другие легкие элементы. И нашли, что подобно алюминию вели



Открытие искусственной радиоактивности.

себя бор и магний. Тогда они опубликовали полученные результаты, сделав вывод, что под действием альфа-частиц в различных элементах происходят сложные ядерные реакции. В результате их испускается нейтрон, а остающееся ядро оказывается неустойчивым и распадается, излучая позитроны.

Это было открытие огромной важности. Практическое значение его трудно переоценить. Человечество получило возможность искусственно изготовлять различные радиоактивные вещества, которые так нужны были и медицине, и другим наукам. Полученные радиоактивные изотопы стали называть радиоэлементами.

Сейчас искусственно созданные радиоактивные элементы занимают почетное место в самых разнообразных областях науки и техники.

Открытие радиоактивных изотопов дало новый толчок к проведению различных опытов с ядерными превращениями. Вскоре молодой итальянский ученый Энрикс Ферми проделал в Риме целую серию замечательных опытов с нейтронами.

Он подверг бомбардировке этими частицами буквально все элементы периодической системы Менделеева. Тут-то и «посыпались» радиоактивные элементы. Оказалось, что почти все элементы под действием нейтронов становятся радиоактивными.

Множество радиоэлементов создано в настоящее время с помощью нейтронов. Надо только иметь мощный источник нейтронов, а затем подставить под их удары нужное вещество. Нейтроны бомбардируют ядра атомов, все больше и больше становится радиоактивных ядер. Но вот устанавливается равновесие. Сколько новых радиоактивных ядер образуется, столько же их и распадается. Бо́льшую активность уже не получить.

Таким образом, все зависит от мощности нейтронного источника. Чем больше нейтронов он может дать в единицу времени, тем мощнее получится и радиоактивный источник, изготовленный из стабильных элементов. Теперь ученые получают радиоактивные изотопы не только с помощью нейтронов, но также и ряда других частиц.

КАК СНЯТЬ ШАПКУ-НЕВИДИМКУ

Мы много говорили о различных опытах, которые ставили ученые с радиоактивными веществами, с ядерными частицами и ядрами различных элементов. Но при этом мы обходили вопрос о том, какие же способы обнаружения частиц они применяли, какими приборами пользовались. А этих приборов очень много, и число их увеличивается со сказочной быстротой.

О размерах частиц мы уже говорили. Они настолько малы, что увидеть их никогда не представится возможным.

Поэтому с самого начала ученые старались регистрировать не самое частицу, а только факт ее прохождения в определенной среде, ее след.

Надо сказать, что техника измерений росла вместе с открытием новых явлений. Одно как бы вынуждало и подстегивало другое. Понадобилось регистрировать полет альфа-частиц — был создан экран из сернистого цинка. А с помощью покрытой сернистым цинком пластинки Резерфорд проделал свои знаменитые опыты по рассеянию альфа-частиц.

Спинтарископ давал возможность подсчитать число альфа-частиц, испускаемых радиоактивным препаратом. Ученые буквально сидели и считали вспышки, считали попадающие на экран частицы. Это, разумеется, занятие очень утомительное, да и результаты не всегда получались точные. Кроме того, многое зависело от зрения самого ученого: сколько он видел, столько частиц и регистрировал.

Сейчас считает вспышки уже не человек, а специальное сложное устройство — сцинтилляционный счетчик.

СТОЛОВЫЙ ПРИБОР

На одной научной конференции демонстрировалось совершенно необычайное устройство. Вилка и нож, зажатые в обычные штативы, несколько электрических батарей и электромагнитный счетчик, отсчитывающий возникающие импульсы тока. Как только к этому странному сооружению подносили радиоактивный источник, счетчик начинал щелкать.

Вилку и нож можно было заменить любыми металлическими предметами — скажем, даже обычными гвоздями. Все равно! Оригинальное устройство аккуратно считало бы попадающие между гвоздями заряженные частицы. Что это за прибор?

Два металлических предмета служат электродами. К ним подведено электрическое напряжение. Но между электродами находится воздух. Поэтому тока в цепи нет. Допустим теперь, что между электродами пройдет заряжен-

ная частица. На своем пути она создаст массу ионов, и воздух станет проводящим. Вот и получилось устройство, называемое ионизационной камерой. Конечно, настоящие измерительные приборы запаяны, воздуха или другого газа в них немного. Но по сути дела они ничем не отличаются от шуточной конструкции из ножа и вилки.

Ионизационный счетчик Гейгера.

Гораздо чаще для регистрации отдельных частиц применяется так называемый счетчик Гейгера. Это — самый распространенный измеритель различных ядерных частиц. С его помощью можно регистрировать любую частицу. От нее требуется лишь одно — чтобы она попала внутрь счетчика и создала там немного ионов. Напряжение на счетчике Гейгера очень большое. Разгоняясь под действием этого напряжения, ионы на своем пути срывают электроны с оболочек встреченных ими нейтральных атомов и создают грандиозную ионную лавину. Получается такой мощный ток, что его уже легко измерить обычными приборами.

Счетчики Гейгера позволяют производить интереснейшие наблюдения над различными частицами, мчащимися к нам из глубин мирового пространства. Эти исследования приобрели особенно широкий размах после запуска искусственных спутников Земли.

Исключительно важно знать направление распространения космических частиц. Для того чтобы определить направление полета частицы, пользуются не одним счетчиком, а целой группой. Существует «хитрая» радиосхема, называемая схемой совпадений. Скажем, соединены по такой схеме три счетчика. Сработает она только в том случае, когда частица пролетит через все три счетчика. Тогда мы точно можем сказать, как именно эта частица пролетела, нарисовать ее путь в пространстве.

А для того, чтобы точнее сделать это, чтобы не спутать направление полета одной частицы с направлением полета нескольких, применяется еще одна схема, называемая схемой антисовпадений. Там, наоборот, частица, прошедшая через два или несколько счетчиков, не зарегистрируется. Применяя сочетание этих схем, можно очень точно подсчитать количество различных частиц, бомбардирующих под разными углами нашу планету. Так и устроены «телескопы» для регистрации космических частиц.

ТУМАН ПОМОГАЕТ ВИДЕТЬ

Среди многочисленного семейства измерителей ядерных частиц имеется замечательное устройство, которое Резерфорд назвал «самым оригинальным и изумительным инструментом в истории науки». Это — камера Вильсона.

Английский ученый Вильсон занимался вопросами образования тумана. Он обнаружил интересный факт — туман очень хорошо образуется, если в воздухе есть пылинки. В воздухе содержится водяной пар. Как только температура воздуха падает, часть воды должна выпасть из него, так как в нем при определенной температуре может содержаться только строго определенное количество водяного пара.

Водяной пар конденсируется в виде мельчайших капелек. Особенно легко происходит конденсация на пылинках. Как говорят, они служат центрами конденсации — центрами образования капелек.

Но не в этом основная заслуга Вильсона. В этих исследованиях он только повторил то, что до него уже получили другие ученые. Но Вильсон показал, что не только вокруг пылинок могут образоваться капельки воды или какой-нибудь другой жидкости, пары которой находятся в воздухе. При некоторых условиях этими центрами могут служить... ионы! Сами они не видны, их размеры ничтожны. Но вот капли, собирающиеся на этих ионах, можно прекрасно увидеть.

Вы, наверное, уже поняли, в чем суть идеи Вильсона. Ведь на пути заряженной частицы образуется целая туча ионов. Вокруг них начинают образовываться капельки тумана.

Если это произойдет быстро, то ионы, образовавшиеся на пути частицы, не успеют далеко отойти от того места, где они образовались. И тогда в воздухе будет виден след частицы. Да, таким образом можно увидеть след той самой частицы, которую природа с самого начала обрекла на невидимость!

А след частицы можно сфотографировать. И это будет уже вполне реальное доказательство наличия того или иного ядерного процесса, появления той или иной частицы. Камеру Вильсона недаром называют «судьей ядерной физики». Это совершенно справедливое название. Сколько теорий разбилось при проверке этим совершенным аппаратом, сколько неожиданных открытий подтвердилось благодаря ей! Трудно спорить с «автографом природы»— так можно назвать снимки, сделанные в камере.

Начиная с опытов Резерфорда, все открытия ядерной физики проверялись в камере Вильсона. Именно здесь подтверждено открытие нейтрона, здесь открыли позитрон, здесь изучались всевозможные ядерные реакции, здесь были получены снимки всех новейших частиц.

Существует множество самых разнообразных конструкций этого замечательного устройства. Принцип действия всех их один и тот же. В какой-то момент в камере происходит адиабатическое расширение. Газ, которым она наполнена, охлаждается, пары жидкости начинают конденсироваться. Если в этот момент через камеру пролетела какая-нибудь заряженная частица, то на ионах ее следа начнется образование капелек. В момент расширения камеры включается фотоаппарат.

На снимке получается картина, которая была в камере в момент съемки. Если в это время летела частица, то ее след мы увидим и на снимке.

Для наблюдения за различными ядерными реакциями надо наполнить камеру соответствующим газом, содержащим интересующие нас ядра. А потом уже на снимках получаются различные взаимодействия с этими ядрами.

«Телескоп» для регистрации космических частиц.

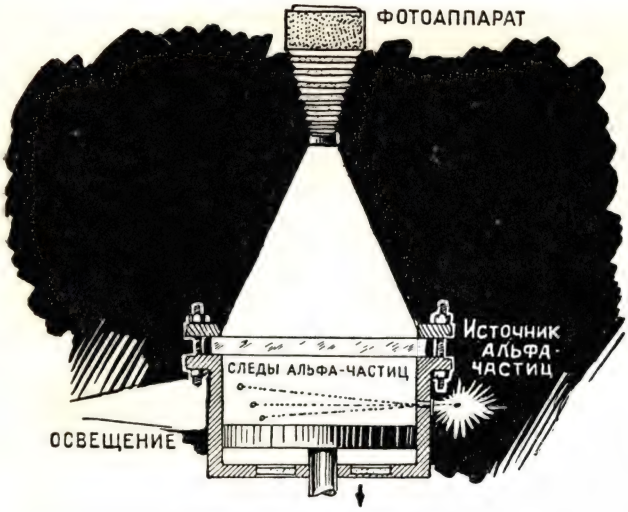


Схема камеры Вильсона.

Акад. Д. В. Скобельцын, которого мы все знаем как замечательного ученого и общественного деятеля, очень много работал с камерами Вильсона. Он предложил интересное усовершенствование, которое получило в науке его имя.

Метод Скобельцына заключается в том, что камеру Вильсона помещают в сильное магнитное поле. Следы частиц искривляются. Это искривление зависит от величины и знака заряда частицы. С помощью этого устройства сейчас изучают всевозможные заряженные частицы. Оно позволяет точно определить массу частицы и величину ее заряда.

А вот еще одна камера, очень просто устроенная. Для нее не нужно специального, очень сложного механизма расширения. Для нее не существует и так называемого «времени восстановления» — времени, за которое камера как бы приходит в себя: в ней восстанавливается нормальное состояние газа, опадают капельки, устанавливается нормальное давление. Эта камера действует все время, и называется она диффузионной камерой.

Это устройство весьма простое. Его вполне можно изготовить в школьных условиях.

Представьте себе банку, самую обычную банку. Сверху ее подогревают, а снизу охлаждают. Газ идет сверху вниз. Но примерно в середине камеры, где холоднее, начинается конденсация частичек жидкости, которые в ней имеются. Такая камера действует все время, только успевай фотографировать.

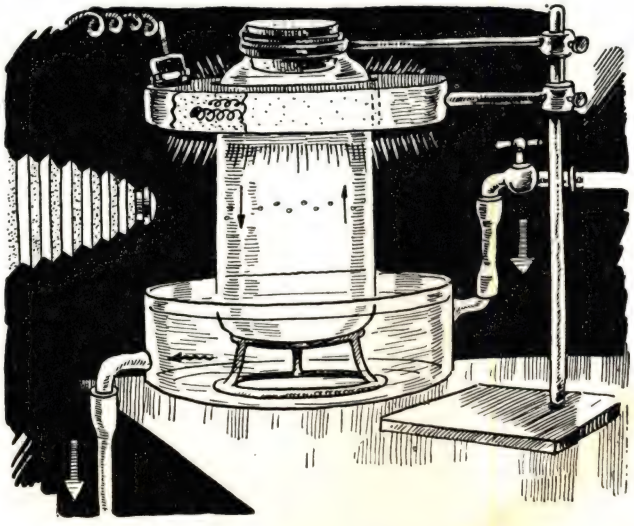
Однако самая замечательная камера — это, конечно, управляемая камера Вильсона. Здесь снимки делаются не вслепую, камера как бы сама знает, что она должна фотографировать.

Вот на большом лабораторном столе расположена довольно сложная установка. Посредине вы видите знакомую уже нам обыкновенную камеру Вильсона. Возле нее также знакомые счетчики Гейгера. Два счетчика — по одному с каждой стороны. А у самой установки никого нет. Люди сидят совсем в другом углу комнаты и словно чего-то ждут. Проходит некоторое время, слышится характерный щелчок, и мгновенно вспышка света озаряет комнату. Это сработала камера. Произошло расширение, зажегся свет сильной лампы, и щелкнул фотоаппарат. Но кто дал сигнал, кто включил все эти приборы?

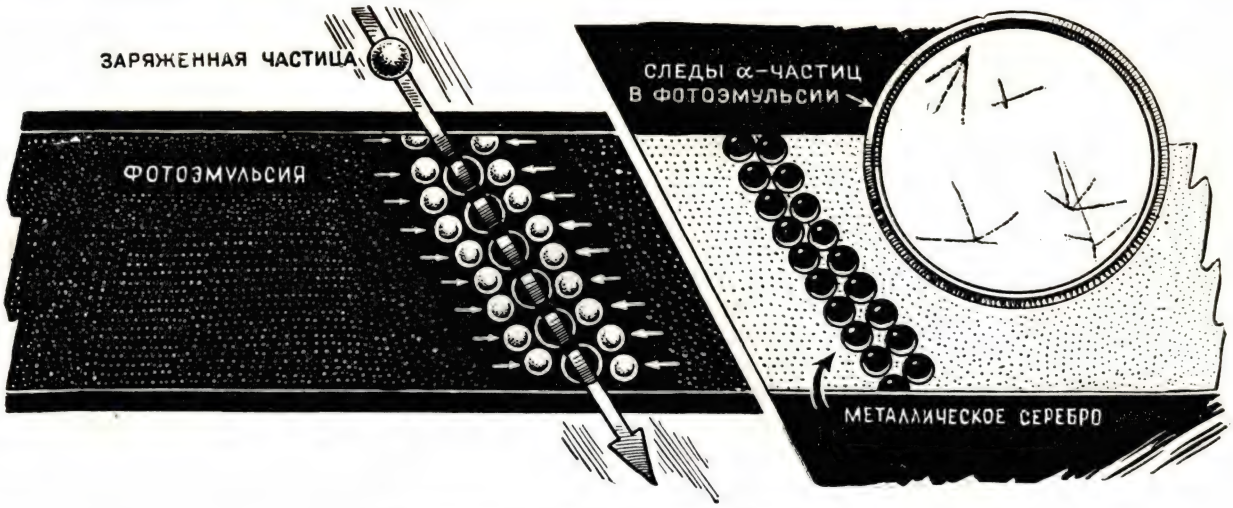
Их включила частица, та самая, след которой был только сфотографирован. Недаром он тянется через весь снимок.

Но как же такая маленькая, немощная частица, обладающая такой мизерной массой, сумела сама включить громоздкую аппаратуру? Очень просто: ей помогла схема совпадений. Счетчики, стоящие по бокам камеры, соединены на совпадения. Как только частица проходит через оба счетчика, а следовательно, и через камеру, схема срабатывает, заставляет включиться расширяющий механизм, лампу, фотоаппарат и т. д.

Одним словом, частица сама себя фотографирует. Вот что такое управляемая камера Вильсона. С ее помощью можно определять частицы, различая их по знаку, величине заряда и энергии, можно наблюдать различные



Диффузионная камера.



Заряженная частица в фотопластинке.

ядерные реакции. Этот замечательный прибор повсеместно используют в лабораториях для научных исследований.

РАЗНООБРАЗНЫЕ МЕТОДЫ

Ядерные частицы регистрируют не только с помощью ионизационных приборов, камер Вильсона и сцинтилляционных счетчиков. Совсем нет! За последнее время создано множество разнообразнейших установок, измеряющих заряд, массу и количество пролетевших частиц. Вот некоторые из них.

Открытие радиоактивности началось с того, что Анри Беккерель положил кусочек урановой руды на тщательно завернутую в черную бумагу фотопластинку. И с тех пор одним из самых распространенных методов регистрации ядерных частиц стал метод фотопластинок. Но эти пластинки, разумеется, резко отличаются от тех, к которым мы привыкли при обычном фотографировании.

Советские ученые Л. В. Мысовский и Г. Б. Жданов создали современные методы использования фотоэмульсий в ядерной физике. Толщина этих эмульсий доходит до сотен микрон.

Как же работает фотопластинка, каким образом она помогает регистрировать ядерные частицы?

При прохождении заряженной частицы через фотоэмульсию на ее пути образуются ионы. Эти ионы служат центрами проявления — вокруг них откладывается металлическое серебро. При проявлении видно направление, по которому пролетает частица.

Чем особенно хороша фотопластинка для изучения различных ядерных процессов? Пролетела одна частица — след ее остался внутри пластинки в скрытом виде. Поэтому пластинка вполне пригодна для фиксации других частиц. Таким образом в фотоэмульсии могут накапливаться следы различных частиц, разнообразных ядерных реакций.

Они не мешают друг другу. Но вот пластинка проявлена. По величине следа, по числу зерен (черные проявившиеся точки на пластинке) мы можем судить и о заряде, и скорости частиц. Кроме того, таким способом можно определять и массу частиц.

Каждое новое открытие ядерной физики тотчас же становится поводом для обсуждения: а нельзя ли приспособить его для измерительной техники?

Так произошло и с интересным открытием нашего советского физика П. А. Черенкова. Он обнаружил, что частицы, распространяющиеся в веществе со скоростью, большей скорости света в этой среде, излучают. Свечение зависит от

Свечение Черенкова.

скорости, заряда частицы и вещества, в котором частица распространяется.

Поэтому счетчик, предложенный Черенковым, превосходно измеряет скорости частиц. А ведь это как раз самое трудное — правильно измерить скорость частицы.

И вот, наконец, еще одна установка — регистратор ядерных частиц — пузырьковая камера.

Вспомним, как начинается кипение жидкости. Стремительно поднимаются вверх пузырьки воздуха. А в каждом из них — пары жидкости. До этого испарение шло только с поверхности. А теперь испарение происходит также внутри тех воздушных пузырьков, которые всегда содержатся в жидкости. Но если жидкость раньше уже кипела, да еще несколько раз, то этих пузырьков в ней будет совсем немного, и при обычной температуре кипение уже не начнется. Более того, можно, осторожно повышая температуру, нагреть жидкость гораздо выше точки кипения. Тогда она называется перегретой. Это состояние, как и следует ожидать, будет неустойчивым. Малейшее сотрясение, появление в жидкости хотя бы одного пузырька воздуха сразу вызывает кипение. При этом закипать начинает вся жидкость одновременно.

Перегретую жидкость можно получить еще и другим способом. При понижении давления температура кипения падает. А если давление понижать осторожно, медленно, предварительно лишив жидкость пузырьков воздуха, то, хотя температура ее будет выше точки кипения при данном давлении, жидкость кипеть не будет в течение некоторого времени, даже если быстро понизить давление.

И опять-таки центрами образования пузырьков пара в перегретой жидкости могут служить ионы, образованные заряженной частицей, попавшей внутрь нее. Так родилась пузырьковая камера. Устроена она очень просто. Нагретая жидкость наполняет стеклянный сосуд. Давление на одну из его стенок может меняться. Если давление понизить очень быстро, то может наступить перегревание жидкости. Тогда на ионах, созданных пролетевшей в это время микрочастицей, начинается образование пузырьков пара.

Обычно в пузырьковых камерах используют сжиженные газы, эфир, пропан, бензин и т. д. Есть камеры, работающие на жидком водороде и азоте. Эти газы находятся под большим давлением: иначе из них не получишь жидкости.

Много различных методов используется для того, чтобы обнаружить и зарегистрировать микрочастицы. И чем больше существует разнообразных методов, тем легче провести измерения, тем точнее результаты.

До сих пор мы все время говорили о различных регистраторах заряженных частиц. Но ведь в практике часто приходится иметь дело с гамма-излучением или с нейтронами.

Что касается гамма-лучей, то с ними дело обстоит совсем просто. Они выбивают из стенок любых счетных устройств электроны, которые затем регистрируются описанными выше способами.

Нейтроны не обладают электрическим зарядом. Поэтому приборы, основанные на методах ионизации частицами какого-нибудь рабочего вещества, для них непригодны. Но зато нейтральные частицы весьма активно реагируют с целым рядом различных веществ.

Атом, захватывающий нейтроны, может стать искусственно-радиоактивным. На этом и основан один из методов их регистрации. На пути потока этих частиц ставят пластинку какого-нибудь вещества, особенно жадно поглощающего нейтроны. И потом, измерив величину наведенной активности, судят по ней о количестве захваченных нейтронов.

Сталкиваясь с легкими ядрами, в частности с ядрами водорода, нейтроны могут так сильно ударить это ядро, что оно покинет атом, сделается свободным. Появится заряженная частица, на пути которой начнется образование ионов. Значит, наполнив водородом счетчик Гейгера, можно регистрировать нейтроны по ядрам отдачи — протонам.

Некоторые легкие элементы (бор, литий), захватывая нейтроны, испускают альфа-частицы. Значит, наполняя счетчики борсодержащим газом, можно зарегистрировать нейтронное излучение.

Короче говоря, все описанные нами устройства годятся и для регистрации нейтронов. Надо только в рабочее вещество этих приборов ввести вещества, испускающие при захвате нейтронов какие-нибудь определенные частицы.

КЛАДОВЫЕ ПРИРОДЫ

Открытие Беккереля показало, что в глубине атома находятся запасы энергии. Заряженные частицы, вылетающие оттуда при радиоактивном распаде, несут эту энергию. Опыты Кокрофта и Уолтона открыли для человечества еще один путь освобождения энергии, скрытой в атомных

ядрах. Этот путь — ядерные реакции, взаимодействие ядер.

Стало ясно, что ядерная энергия действительно находится в скрытом состоянии в ядрах атомов различных элементов. Надо лишь научиться ее оттуда получать.

Освобождение внутриядерной энергии — вот коренная задача современной науки. Если эта задача будет решена, человечество получит поистине неисчерпаемые запасы энергии, которые так необходимы ему в наш век гигантского развития техники.

Существует множество различных ядерных реакций. Некоторые из них сопровождаются поглощением энергии, другие, наоборот, выделением энергии. Одну из таких реакций — реакцию дезинтеграции (разбиения) лития — как раз и изучали Кокрофт и Уолтон. Таким образом, в целом ряде случаев можно освободить энергию, скрытую в недрах атомных ядер.

Но ядерные реакции — явление очень редкое. Иногда нужно послать в цель тысячи и десятки тысяч ядерных «снарядов», чтобы получить одну такую реакцию. И хотя при таком единичном взаимодействии и выделится какое-то относительно большое количество энергии, но общая затраченная энергия будет все же во много раз превосходить полученную.

Чтобы понять, откуда же берется освобождаемая энергия, отвлечемся от процесса деления ядер и займемся немного арифметикой.

На возможность освобождения внутриядерной энергии впервые указал замечательный ученый нашего времени Альберт Эйнштейн. Он показал, что масса и энергия — это взаимосвязанные величины.

Изменение массы ядер реагирующих веществ влечет за собой соответствующее изменение количества энергии. Короче говоря, когда масса ядер конечных продуктов реакции меньше общей массы всех ядер, участвовавших в реакции, то должна выделиться энергия, и притом немалая. Эта энергия не существует сама по себе — нет, она обязательно проявляется как энергия движения микрочастиц или фотонов.

Количество энергии, связанное с массой, вычисляется таким образом: массу надо умножить на квадрат скорости света в пустоте:

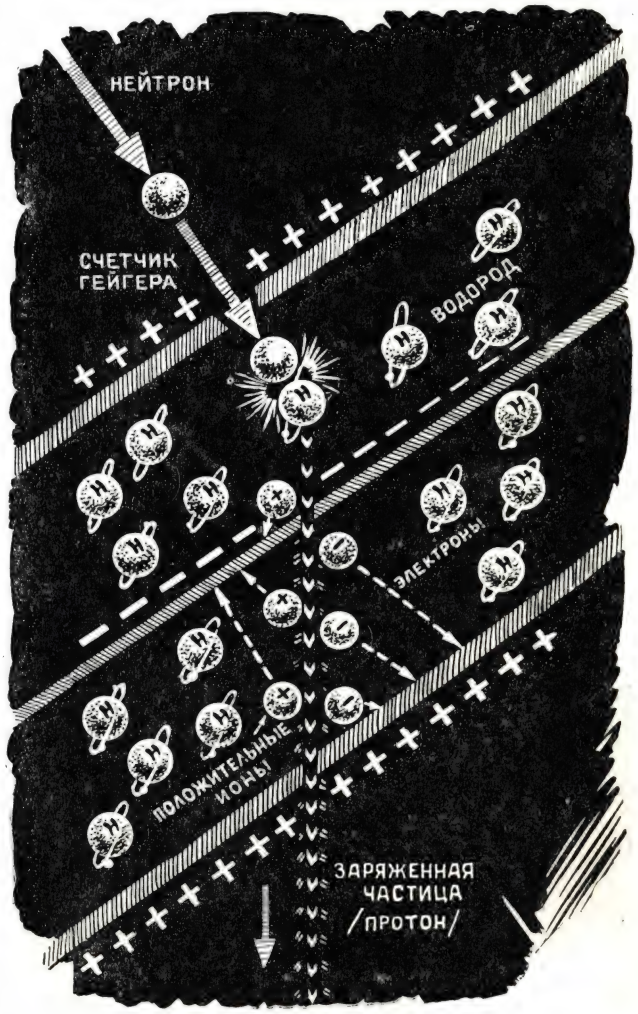
$$E=mc^2.$$

Но как же использовать эту формулу для того, чтобы узнать, какое количество энергии может выделиться при различных ядерных реакциях?

Для этого нам придется ввести величину, называемую дефектом массы. Она представляет собой разность между массой ядра, которую мы вычисляем, исходя из числа содержащихся в нем нейтронов и протонов, и массой, определенной опытным путем. Всегда, когда происходит ядерная реакция, нужно подсчитать массу реагирующих ядер и массу ядер, получившихся в результате реакции.

Такой подсчет показывает, что иногда энергия должна выделяться при соединении ядер в более тяжелые (синтез), а иногда при их разбиении на более легкие (деление).

Но сначала ученые обнаружили опытным путем и реакцию разбиения лития и реакцию деления тяжелых ядер, при которых освобож-



Регистрация нейтронов.

далась энергия. Для того чтобы разбить ядро лития, надо было затратить множество ядерных снарядов. В конечном счете выделившаяся энергия оказывалась во много раз меньшей затрат, которые пошли на взрыв одного ядра.

В 1934 г. ученые обнаружили, а в 1939 г., наконец, объяснили замечательную реакцию, в которой действительно выделялась внутриядерная энергия, причем происходило это без особенных затрат, за счет способности нейтронов легко проникать в глубь атомных ядер.

Было открыто деление урана.

СЛИШКОМ МНОГО НОВЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

В тихой лаборатории в Риме группа молодых энтузиастов науки под руководством итальянского ученого Энрико Ферми проводила свои первые опыты. В установке, которой они пользовались, главную роль играл большой бак с водой (в воде нейтроны замедлялись), несколько счетчиков радиоактивных частиц и источник нейтронов.

Вот и все. И с помощью этой элементарной установки Ферми сделал столько открытий, сколько не всегда удается сделать в стенах многих первоклассно оборудованных лабораторий. Можно себе представить, с каким трепетом погружал он урановую руду в бак, где блуждали нейтроны. И вот уран облучен, его подносят к счетчику бета-частиц. И счетчик показывает активность! Под действием нейтронов уран стал бета-активен. Но тогда, выходит, в нем должен образоваться новый элемент. Элемент, которого нет в таблице Менделеева, — трансурановый элемент!

У урана знали тогда три изотопа — с атомными весами 234, 235 и 238. Если даже допустить, что каждый из этих изотопов под действием нейтронов становился радиоактивным, то могло появиться только три излучателя. А их оказалось четыре! Кривые распада показывали наличие сразу четырех излучателей. Тут было чему удивиться.

Состав урана.

Уран самым тщательным образом очистили. Были созданы все гарантии того, что активности не могут создаваться примесями. Кроме того, были изучены всевозможные бета-активные вещества. Среди них не оказалось ни одного, период полураспада которого совпадал бы с периодами уранового излучения.

Начали делать всевозможные предположения, тут же проверявшиеся многочисленными опытами. Прежде всего надо было установить, какие же химические вещества появляются в результате реакций. Здесь пригодился метод соосаждения, предложенный когда-то Пьером и Марией Кюри.

В чем состоит сущность этого метода? Изотопы какого-нибудь элемента отличаются друг от друга только атомным весом. Число электронов на внешней оболочке атома, а следовательно, и химические свойства у них одинаковы. Этим и пользуются ученые. Пусть в каком-то соединении образовалось известное количество радиоактивных атомов. Тогда надо растворить это вещество и добавить в раствор нерадиоактивных стабильных изотопов искомого элемента.

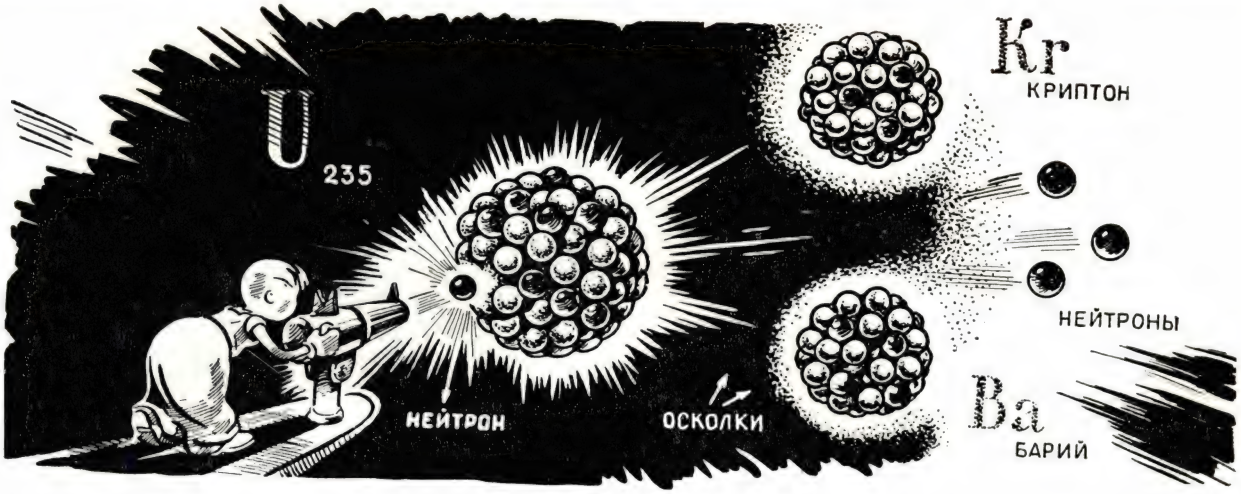
Теперь надо каким-то образом выделить этот элемент. Химия знает множество таких способов, так что это нетрудно сделать. Но тогда вместе со стабильными атомами из раствора выйдут и образовавшиеся там радиоактивные. Если же они не образовались, то при осаждении мы не получим никакой активности.

С помощью соосадителя можно выделить из раствора подавляющее большинство образовавшихся там радиоактивных атомов, как бы мало их там ни было.

Пробуя осаждение различными элементами, мы как бы испытываем раствор, определяем, какие излучающие изотопы в нем содержатся. Таким методом начали изучать и облученный нейтронами уран. Перепробовали множество элементов, с 86 номера до конца периодической системы. Все было безрезультатно. Таинственные активности упрямо не желали осаждаться.

Ученые терялись в догадках. Что же все-таки образовывалось в уране? Откуда появились четыре разных периода полураспада?

А тут еще дело совсем осложнилось. Выяснилось, что не четыре различные активности по-



Деление ядер урана.

лучаются при облучении урана нейтронами, а целых девять. Ни один теоретик не мог ответить на интересовавшие науку вопросы.

ВЕЛИКОЕ ОТКРЫТИЕ

Прошло четыре года, а ученые все еще не могли разобраться в том, что же все-таки происходит в ядрах урана.

В 1938 г. французские ученые Ирен Кюри и Савич почти напали на решение. Они опять облучили нейтронами злополучный уран. Теперь они обнаружили новую активность с доселе неизвестным периодом полураспада. Этот излучатель они осадили при помощи редкого элемента — лантана. Но, не посмев сказать, что в уране образуется лантан — элемент, стоящий в центре периодической системы,— они приписали активность будто бы образующемуся при облучении урана тяжелому элементу — актинию. Дальнейшие наблюдения показали, что это не актиний. На пути науки появилась очередная загадка.

А ведь в руках французских ученых действительно был лантан. Они сами испугались замечательного открытия, которое буквально шло им в руки.

Немецкие ученые Ган и Штрассман занимались «урановой проблемой» с самого ее возникновения. Им было очень удобно работать вместе: Ган был прекрасным химиком, а Штрассман — физиком.

Снова на сцене появился уран, облученный нейтронами. На этот раз в качестве осадителя взяли металл барий. Вместе с ним выпала в осадок и активность. Но через некоторое время в этом осадке появилась и другая активность, та самая, которую получили Кюри и Савич. Активности сравнивали по периоду полураспада. Ведь у каждого радиоактивного изотопа свой период полураспада.

В периодической системе элементов Менделеева барий находится в одной группе с радием. Поэтому ученые предположили, что в уране под действием нейтронов образуется именно радий. Правда, было абсолютно непонятно, как это происходит.

И вот для подтверждения своей теории Ган и Штрассман поставили контрольный опыт. Они растворили таинственный элемент, полученный в уране, добавили в раствор изотопы радия и бария и затем разделили эти элементы. Каково же было их удивление, когда вещество, которое давало таинственную активность, ушло вместе с барием!

Итак, оказалось, что в уране, облученном нейтронами, появляется барий — элемент, находящийся в середине периодической системы элементов. Одновременно с ним образовывался инертный газ—криптон. Оба эти элемента оказались радиоактивными, хотя их природные изотопы всегда стабильны.

В уране появлялись не только барий и криптон. Там были найдены радиоактивные бром, лантан, йод, теллур и многие другие элементы.

Тут уже ничего не оставалось делать: ученые сообщили изумленному миру, что в ядре атома урана под действием нейтронов происходит нечто невообразимое — он делится на два оскол-

ка, каждый из которых является радиоактивным изотопом.

А изотоп, найденный Кюри и Савичем, действительно оказался лантаном. Он появлялся из радиоактивного бария после его распада.

Открытие немецких ученых произвело впечатление разорвавшейся бомбы. Сотни ученых стали повторять их опыты и убеждались, что все это не сон, не мираж, а самая реальная действительность. Так было открыто деление урана.

ПЕРВЫЙ ПУТЬ К ОСВОБОЖДЕНИЮ ВНУТРИЯДЕРНОЙ ЭНЕРГИИ

Что же установили ученые?

Ядра тяжелых элементов, в частности уран,— скопление множества частиц. В ядро урана входит 235 или 238 нуклонов. Поэтому такое собрание частиц иногда оказывается недолговечным. Достаточно только одного нейтрона, чтобы случилось неожиданное: ядро урана стремительно распадается на две части. И обе половинки — ядра более легких элементов — разлетаются в разные стороны, унося с собой выделившуюся в этом процессе энергию.

Так происходит деление одного ядра. При этом выделяется порядочная доза энергии. Однако она велика только с точки зрения мельчайших частиц, участвующих в реакции. Чтобы получить заметный выход энергии, надо разделить миллионы миллиардов ядер урана. Но где взять для этого нейтроны?

Чтобы зажечь костер, нужны спички. А здесь постоянно потребуются все новые и новые порции таких спичек, нужно разбивать все новые и новые ядра урана. Оказалось, что такие нейтроны может поставить сам уран. При делении его ядер, кроме осколков деления, выделяется также и несколько нейтронов — от двух до трех. Что касается первичных нейтронов, которые должны «зажечь костер»— начать реакцию, то их тоже не надо искать. Эти частицы может дать все тот же уран.

Чтобы зажечь атомный костер, тоже нужны «спички».

В 1941 г. советские физики Г. Н. Флеров и К. А. Петржак сделали исключительно интересное открытие. Они установили, что обычный уран может делиться сам по себе без воздействия каких бы то ни было нейтронов. Он и даст первичные нейтроны.

Природный уран содержит в основном два изотопа. Это уран-238 (т. е. изотоп урана с атомным весом 238) и уран-235. Первый изотоп наиболее распространен, а второго всего лишь $\frac{1}{140}$ часть от общей массы природного урана.

Когда стали изучать, какому из них человечество обязано таким замечательным эффектом— делением, оказалось, что делятся оба изотопа. Но уран-235 оказался более «покладистым». Он делится нейтронами любых энергий. Ему даже лучше, если скорость нейтрона невелика. Но ядер урана-235 очень мало. А для деления более распространенного урана-238 нужны нейтроны очень больших энергий. Более медленные нейтроны, обладающие сравнительно небольшими скоростями, для этого уже непригодны. Появляющиеся при делении нейтроны под влиянием столкновений с ядрами урана быстро теряют скорость и разделить ядро урана-238 уже не могут. Правда, они захватываются ураном-238 и при небольших энергиях. Только деление тогда не происходит, а образуется трансурановый элемент, которого до открытия деления урана не знали. Вот что при этом происходит. Сначала уран-238 захватывает нейтрон:

$$U_{92}^{238} + n_0^1 \rightarrow U_{92}^{239}.$$

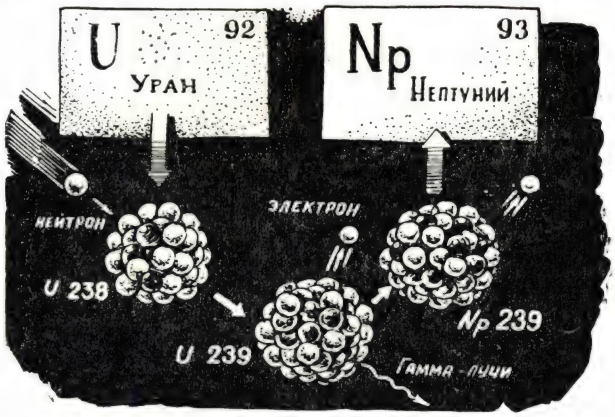
Образующийся изотоп урана (уран-239) бета-активен. Он распадается и образует трансурановый элемент — нептуний:

$$U_{92}^{239} \rightarrow Np_{93}^{239} + \beta.$$

Нептуний в свою очередь также бета-активен. Он живет недолго, его период полураспада всего лишь 2,4 дня. При этом возникает еще один трансурановый элемент — знаменитый плутоний:

$$Np_{93}^{239} \rightarrow Pu_{94}^{239} + \beta.$$

Плутоний, так же как и уран-235, прекрасно делится под действием самых разнообразных нейтронов. В этом смысле он очень ценный элемент.



Образование трансурановых элементов.

Основной изотоп, который используется в ядерных установках, — это уран-235. Чем меньше энергия нейтронов, тем лучше он их захватывает. Поэтому, для того чтобы нейтроны захватывались преимущественно этим изотопом, а не изотопом уран-238, их надо замедлить: ведь при делении ядер урана выделяются довольно быстрые нейтроны.

Итак, чтобы создать установку, в которой освобождалось бы большое количество энергии, надо собрать воедино много атомов урана-235 или создать такие условия в природном уране, чтобы ядра урана-238 «оставляли в покое» нейтральные частички и они захватывались бы только ураном-235.

Тогда на смену захваченным нейтронам будут приходить новые, освободившиеся при делении. Все большее и большее число ядер разделится, все больше энергии выделится, и все больше появится новых нейтронов. Так начинается цепная реакция.

КАК СНЕЖНЫЙ КОМ

Представьте себе, что перед нами некоторое количество урана-235. При самопроизвольном делении там рождаются нейтроны. Поскольку перед нами уран-235, неважно, какая у этих нейтронов скорость. Они обязательно разделят ядра урана, и при этом появятся новые нейтроны. С каждым разом число нейтронов будет все больше, больше будет и делений. Как снежный ком, начнет увеличиваться эта нейтронная лавина. В результате — колоссальный взрыв. Вот что может произойти в уране-235. Так мы с вами на бумаге создали атомную бомбу, в которой и произошла неконтролируемая цепная реакция.

Поскольку она идет бесконтрольно и кончается взрывом, ее используют только в военных целях.

Но обязательно ли в куске чистого урана-235

Как снежный ком, развивается цепная реакция.

Устройство атомной бомбы.

возникнет цепная реакция, которую уже нельзя остановить? Конечно, нет!

Увеличение числа нейтронов в делящемся веществе можно характеризовать так называемым коэффициентом размножения. Этот коэффициент показывает, во сколько раз больше нейтронов появится после поглощения очередной их порции. Если этот коэффициент больше единицы, поток будет все время расти и последует взрыв.

Если урана немного, часть нейтронов будет уходить из него и уже никогда не возвратится обратно. Поэтому и взрыва никакого там быть не может. Такое количество урана, в котором уже может возникнуть взрывная реакция, называется критической массой. Коэффициент размножения в массе урана, меньшей критической, не достигает единицы.

Но если соединить две массы, каждая из которых немногим меньше этой величины, то масса сразу станет больше критической, коэффициент размножения вырастет и разовьется неуправляемая цепная реакция. Произойдет атомный взрыв.

Как же так? Почему же тогда не взрывается природный уран, почему он спокойно лежит на складах? Ведь десятки тонн этого металла хранились и хранятся, не вызывая никаких опасений.

Дело в том, что в природном уране захват нейтронов ураном-238 всегда будет превосходить деление в уране-235. Никогда здесь коэффициент размножения не может стать больше или равным единице. Цепная реакция в куске природного урана любой величины невозможна.

Для нужд энергетики, для постоянного использования внутриядерной энергии необходимо создать в уране управляемую цепную реакцию. Что это значит?

Раз цепная, значит, она должна сама себя поддерживать. Далее идет слово «управляемая»; оно означает, что реакция не должна нарастать, что число делений ядер урана не должно увеличиваться. Мы хотим добиться такого положения, чтобы в каждый момент времени было постоянное количество делений и чтобы мы могли по своему усмотрению менять это количество. Захотели — сделали его больше, захотели — меньше. Число делений — это энергия, которая выделяется в уране в единицу времени. Значит, речь идет о мощности.

Итак, управляемая цепная реакция — такая, в которой постоянна мощность и в которой мы умеем эту мощность по нашему желанию изменять.

Для освобождения ядерной энергии надо иметь «горючий» материал. В данном случае им будет уран. Теперь надо или выделить из природного элемента изотоп уран-235, или работать на природном уране. Во втором случае придется искусственно замедлять нейтроны, чтобы их захватывал только уран-235. Нейтроны замедлятся при столкновении с ядром. Чем легче сталкивающееся с нейтроном ядро, тем больше энергии может он при этом передать.

В качестве замедлителя употребляют различные вещества. Самые легкие ядра — водо-

родные. Но у них есть неприятная «склонность» захватывать нейтроны. Далее идет тяжелый водород: ядра его называются дейтонами, а он сам — дейтерием. Дейтерий не обладает неприятной особенностью своего легкого собрата, но очень дорог. Однако его часто применяют. Он входит в состав очень распространенного замедлителя — тяжелой воды. Чаще всего используют углерод. Обычный графит — не что иное, как чистый углерод. В виде графита углерод и употребляется в роли замедлителя нейтронов.

Кроме замедлителя, нам еще понадобится так называемый отражатель. Очень много нейтронов будет покидать установку, уходить из урана, так и не разделив его ядра. Надо их задержать. Для этого еще раз подставим под удары нейтронов ядра замедлителя. Они оттолкнутся от них и могут повернуть назад. Установку, в которой получают энергию деления ядер урана, окружают слоем того же самого замедлителя. Только называется он теперь отражателем. Это название совершенно верно передает сущность его работы — он отражает попавшие на него нейтроны. Таким образом, резко повышается мощность всей установки.

Называется такая установка ядерным реактором или атомным котлом.

ЕЩЕ ОДИН КОТЕЛ

К известным нам котлам, самым обычным котлам различных предприятий бытового обслуживания и котлам тепловых электростанций, прибавился теперь еще один собрат — атомный котел. Что и говорить — необыкновенный котел!

Замедлители нейтронов.

Реактор имеет четыре основные части. Во-первых, горючее — уран. Иногда природный уран специально обогащают делящимся изотопом, иногда работают на обычном природном элементе. Но во всех случаях его самым тщательным образом очищают от примесей, которые могут захватывать нейтроны. Уран может быть и в виде стержней, и в любом другом виде. Это зависит от конструкции атомного котла.

Затем идет замедлитель. Как мы уже говорили, чаще всего это графит. Нередко применяется и тяжелая вода. Отражатель обычно тоже состоит из графита, но может быть сделан и из различных других материалов.

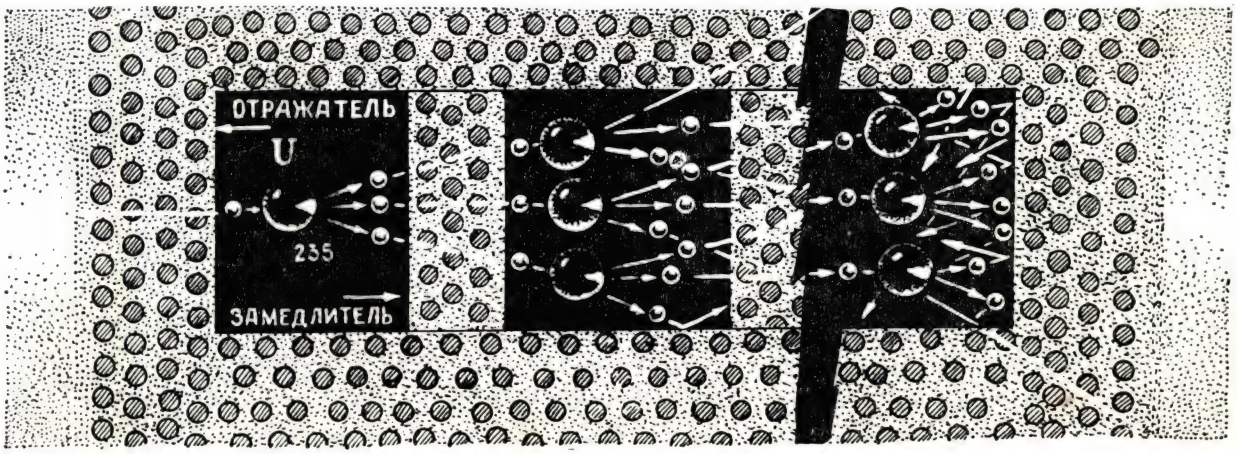


Схема управляемой цепной реакции

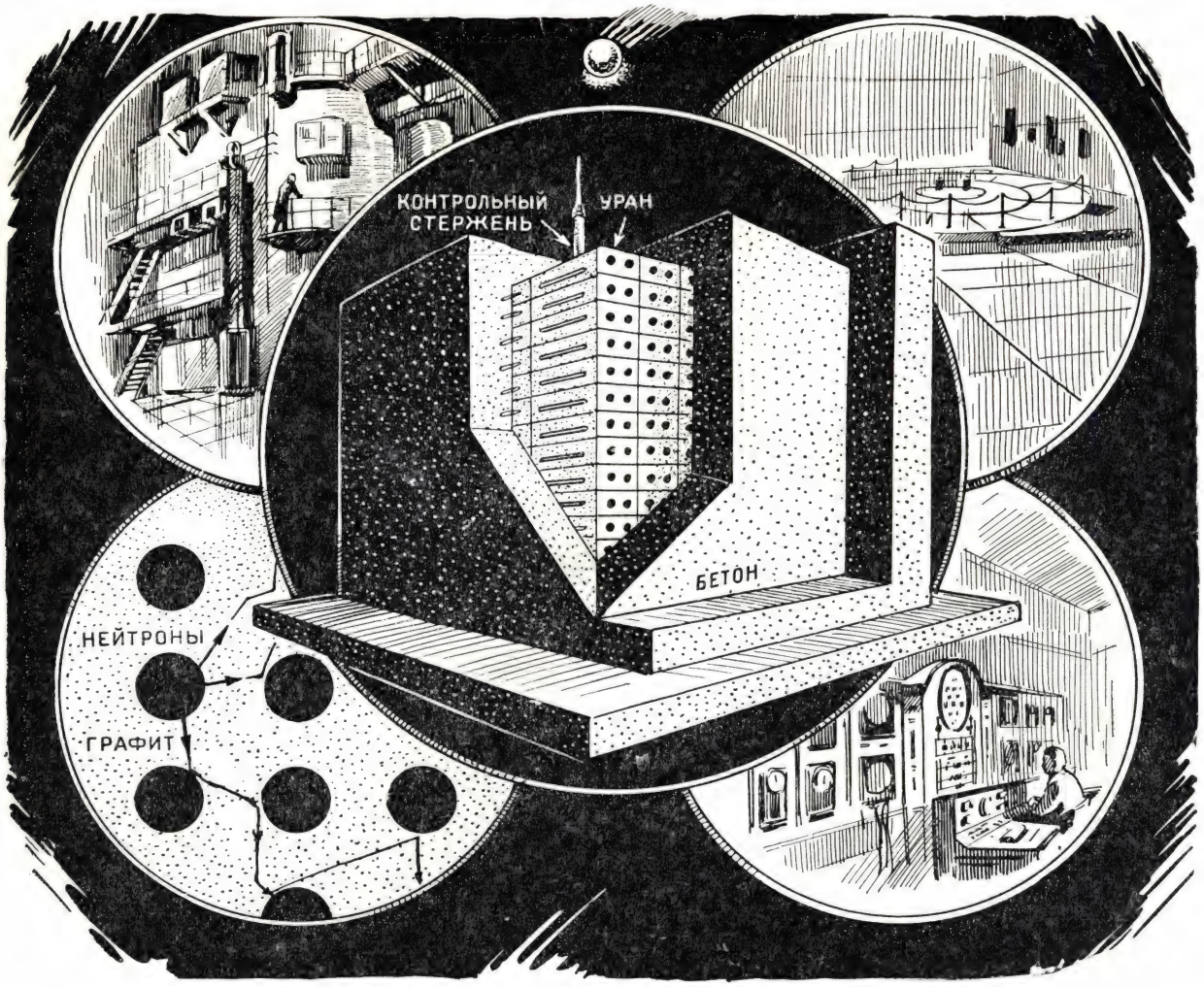


Схема атомного котла.

Кроме замедлителя, отражателя и ядерного топлива, в реакторе есть так называемые регулирующие стержни. Иногда их называют контролирующими. Это очень важная часть устройства. Они необходимы для контроля за работой котла и для его регулирования. Кроме того, без этих молчаливых стражей и помощников нельзя обойтись и при пуске реактора. Состоят они из материалов, хорошо поглощающих нейтроны,— из соединений бора или кадмия.

Реактор работает. Нейтроны исправно делят положенное им число урановых ядер, на смену им выделяются новые нейтроны — словом, все идет прекрасно. Но вот почему-то количество нейтронов начало увеличиваться. Сразу же соответствующие приборы дали об этом знать на пост управления. Стержни немного опустились внутрь реактора и стали более интенсивно поглощать нейтроны. Уровень реакции — число делений в единицу времени — сразу же падает до нужного предела.

Может возникнуть и явление обратного порядка. Котел работает давно, в уране накопилось большое количество примесей, поглощающих нейтроны, поэтому мощность реактора немного упала. Тогда стержни выдвигают из реактора, поглощение нейтронов уменьшается и мощность соответственно увеличивается.

Таково устройство ядерных реакторов. У этого важного сооружения, над конструкцией которого так долго бились люди, оказалось такое простое устройство!

Но эта простота кажущаяся. Тысячи труднейших задач пришлось решить конструкторам, ученым, инженерам, пока они создали первые действующие ядерные реакторы.

Мы не касаемся здесь различных видов ядерных реакторов. В посвященном технике 5-м томе этой энциклопедии интересующиеся читатели найдут их описания. В этих реакторах применяются и уран, и плутоний, и еще один тяжелый элемент — торий.

Атомная энергетика бурно развивается. Величественные планы строительства, намеченные решениями XXI съезда КПСС, открывают огромные перспективы развития перед атомной энергетикой и всей наукой о строении атома в целом. Наша страна, проложившая путь человечеству в деле мирного использования атомной энергии, в предстоящие годы сделает новый скачок вперед в области строительства атомных двигателей для электростанций, судов и др. Еще более величественные перспективы встают перед реакциями синтеза — соединения атомных ядер. Но это отдельная тема. О ней говорится в следующей статье.

ТЕРМОЯДЕРНЫЕ РЕАКЦИИ В ПРИРОДЕ И ТЕХНИКЕ

«Над чем будут трудиться наши ученые в предстоящий период? Это прежде всего овладение управляемыми термоядерными реакциями с целью получения практически безграничного источника энергии». Так сказал товарищ Н. С. Хрущев в докладе на внеочередном XXI съезде КПСС.

Управляемые термоядерные реакции — главнейшая из проблем современной науки. Рассказывая о ее возникновении, сущности, путях решения, нам придется начать издалека — объяснить причины сияния Солнца и звезд, вспомнить о такой неприятной вещи, как водородная бомба, разобраться в некоторых удивительных физических явлениях.

ЯДЕРНЫЙ СИНТЕЗ

Почему светит Солнце?

Нелегким оказался этот вопрос для науки. Каких только гипотез ни строили ученые! Одни сравнивали Солнце с глыбой пылающего угля. Другие думали, что оно разогревается от ударов метеоритов. Третьи видели причину нагрева солнечного вещества в сжатии под действием силы тяжести. Но все эти предположения пришлось отбросить. Они не были в состоянии объяснить огромную величину и удивительное постоянство лучистого потока, изливаемого Солнцем, потока, который несколько миллиардов лет имеет уму непостижимую мощность — полмиллиона миллиардов лошадиных сил. Откуда она берется? Еще каких-нибудь лет тридцать назад титаническая солнечная сила казалась необъяснимой загадкой.

Но наука шла вперед. Человек проник в недра вещества, раскрыл законы движения мельчайших частичек материи. И к концу 30-х годов нашего века физики и астрофизики, вооруженные знанием глубинных законов материального мира, вплотную подошли к разгадке вековой тайны Солнца. Стало ясно, что энергия светила — ядерная, что источником ее служит процесс слияния, синтеза легких атомных ядер в более тяжелые.

Как известно читателю из предыдущих статей, все атомные ядра построены из протонов и нейтронов, которые связаны особыми силами притяжения. Эти ядерные силы действуют на ничтожно малых расстояниях, но обладают огромной величиной. Если бы можно было сделать пленку, состоящую сплошь из «склеенных» атомных ядер, то при толщине всего в десятитысячную долю миллиметра она была бы крепче самой толстой стальной брони. Эти-то могучие силы работают в процессах ядерного синтеза.

Допустим ради наглядности немыслимое.

Что произойдет, если кто-то вдруг остановит Луну?

Она упадет на Землю, что, разумеется, вызовет колоссальную катастрофу. В этом фантастическом примере падения небесных тел сработали бы силы всемирного тяготения.

Представим себе теперь, что мы, сжавшись в миллиарды раз, очутились в микромире. Здесь, поймав протон и нейтрон, мы сближаем их. Вот частицы, подведенные на расстояние в $2 \cdot 10^{-13}$ *см*, «захватываются» ядерными силами и тоже, грубо говоря, «падают» друг на друга. В итоге «микрокатастрофы» протон и нейтрон синтезируются, сливаются, образуя ядро тяжелого водорода — дейтон. Событие это опять-таки

сопровождается выделением энергии, причем относительно огромным, ибо «работающие» здесь ядерные силы исключительно велики, неизмеримо больше сил тяготения (рис. 1).

Надо отметить, что ядерный синтез частиц сопровождается довольно заметным уменьше-

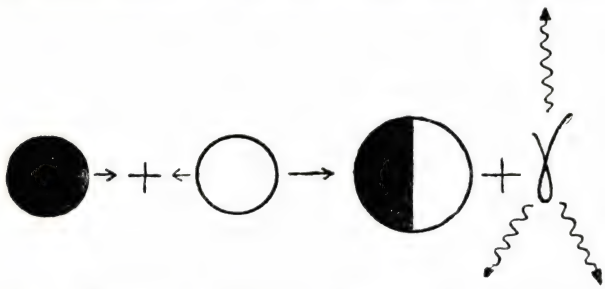


Рис. 1. Протон и нейтрон, сблизившись, сливаются в ядро тяжелого водорода — дейтон. При этой простейшей реакции ядерного синтеза выделяется большая порция энергии (в форме гамма-кванта).

нием их массы. Если масса протона составляет 1,00758, а нейтрона 1,00898, то масса дейтона всего 2,01423, что на 0,00176 меньше простой суммы первых двух масс.

Почему это происходит?

В физике давно известна формула взаимосвязи массы и энергии, выведенная Эйнштейном:

$$E = mc^2,$$

где E — полный запас энергии в теле (в эргах),

m — масса тела (в граммах),

c — скорость света (равная $3 \cdot 10^{10}$ *см/сек*).

Формула Эйнштейна указывает на огромный запас энергии, скрытый в веществе. В копеечной монете, к примеру, содержится ее $9 \cdot 10^{20}$ *эрг*, т. е. столько, сколько может дать за сутки могучая Братская гидроэлектростанция. Любое изменение энергии тела влечет за собой изменение массы. Но при обычных процессах — механических, тепловых, химических — оно совершенно незаметно, ибо слишком незначительно. Зато при ядерных реакциях этот эффект проявляется весьма зримо.

Ядерные силы работают не только при слиянии протонов с нейтронами. Они трудятся при перестройках любых атомных ядер, лишь бы из менее прочных комбинаций частиц получились более прочные. Энергия, оставшаяся «безработной» внутри ядра, неизбежно обретает свободу и работает вне его. Дело происходит так, как если бы мы сначала «разорвали» ядра на составляющие их «кирпичики», а потом построили из тех же «кирпичиков» другие ядра. Если на разрушение уходит энергии меньше, чем выделяется при последующем синтезе, то излишек энергии освобождается. А так как выделение энергии сопровождается уменьшением массы частиц, то законченная «постройка» должна быть легче «строительного материала». Масса, приходящаяся на долю каждой частицы, в исходных ядрах обязательно будет больше, чем в тех, что получаются в результате реакции.

Понятно, что чем резче такая разница, тем выгоднее реакция, тем больше она освобождает энергии.

Такова в самых общих чертах физическая сущность синтеза атомных ядер.

Как же возбуждаются эти реакции, при каких условиях они могут осуществляться? Природа поставила здесь прочную преграду.

Для синтеза частицы должны прежде всего вплотную приблизиться друг к другу. Без помех это происходит лишь в случае слияния протона с нейтроном. Однако подобный процесс не может служить естественным энергетическим источником, ибо нейтроны — частицы нестойкие и в природе их в свободном состоянии нет. Во всех же остальных случаях синтеза должны взаимодействовать атомные ядра. А они всегда несут на себе положительный электрический заряд и, как одноименно заряженные тела, упрямо отталкиваются друг от друга, сопротивляясь сближению.

Взаимное отталкивание настолько велико, что лишь очень быстро мчащиеся навстречу ядра способны, столкнувшись, пробить электрическую броню, добраться до «владений» коротко действующих ядерных сил и вступить в реакцию синтеза. Это, оказывается, и происходит в недрах Солнца.

В НЕДРАХ СОЛНЦА

Солнце состоит главным образом из водорода и гелия. Глубоко под наружным сверкающим покровом светила царит температура, равная примерно 13 миллионам градусов. При таких условиях солнечное вещество не может быть похожим на обычный газ. Бешено мчащиеся и сталкивающиеся атомы вдребезги разбиваются. Получается плотное скопище осколков атомов—атомных ядер и электронов. Эту смесь физики называют плазмой.

В глубинах Солнца ядра атомов водорода — протоны — нередко налетают друг на друга. Порой они сталкиваются с сильного разгона. Но, несмотря на огромную температуру и, следова-

тельно, высокие скорости теплового движения, лишь в редчайших случаях (раз в несколько миллиардов лет) столкнувшиеся протоны получают способность пробить броню взаимного электрического отталкивания.

Любопытно отметить, что такие события происходят не по законам обычной механики, которую вы изучаете в средней школе. Тесное сближение протонов оказывается возможным, вопреки традиционным представлениям «классической» физики. Здесь выходит на сцену квантовая механика — наука о движении и взаимодействии мельчайших материальных частиц. По законам квантовой механики, атомные ядра приобретают способность как бы «проскальзывать» через электрическую броню, преодолевать ее, даже не имея для этого достаточного, согласно представлениям классической физики, запаса энергии.

Представьте себе двух людей, которые, спеша друг к другу, перепрыгивают каждый через десятиэтажный дом, стоящий на пути. Нечто подобное происходит в микромире со сталкивающимися атомными ядрами (правда, в редчайших случаях). Это, пожалуй, один из самых удивительных парадоксов микромира. И именно благодаря ему, оказывается, светит Солнце!

Вот как протекают реакции в недрах светила. В один прекрасный момент случайно, но с неизбежностью, присущей случаю, два протона сближаются друг с другом. В среднем раз в 14 миллиардов лет один из протонов такой пары, не успев отскочить, преобразуется в нейтрон. Слившиеся нейтрон и протон образуют ядро тяжелого водорода — дейтон. При этом испускаются новые частицы — легкий положительно заряженный позитрон и почти неуловимое нейтрино. Стоит заметить, что существование нейтрино — удивительных частиц, не имеющих ни массы покоя, ни заряда и движущихся всегда со скоростью света,— вначале было предсказано физиками-теоретиками и только впоследствии доказано на опыте в результате сложных и тонких экспериментальных исследований. Любопытно и другое: неуловимые нейтрино уносят, оказывается, довольно значительную часть энергетического богатства Солнца. На их долю приходится около пяти процентов энергии солнечного излучения.

Итак, два протона в недрах Солнца сливаются воедино.

С каждой парой солнечных протонов подобное превращение совершается невообразимо редко. Но так как протонов в глубинах светила неисчислимые миллиарды, то «очередь» для все новых реакций наступает непрерывно, и поэтому ядерный синтез разворачивается в громадных объемах солнечной плазмы.

Образовавшиеся ядра тяжелого водорода недолго живут в недрах Солнца. Меньше чем через 6 сек. они присоединяют к себе еще по одному «вольному» протону и превращаются в ядра легкого гелия, а те, проплутав в глубинах Солнца в среднем миллион лет, встречаются друг с другом, чтобы слиться и образовать ядро обычного гелия. При этом отщепляются два протона, оказавшиеся «лишними».

Водород через три этапа попарных ядерных взаимодействий превращается в гелий. Из легких ядер возникают более тяжелые, из менее прочных — более прочные. Каждая из трех ступеней процесса сопровождается выделением солидной порции энергии, которая ускоряет частицы или испускается в виде гамма-лучей.

Описанная цепочка солнечных реакций синтеза носит название протонно-протонного цикла. Вот как он записывается символически (с указанием количества выделяющейся энергии):

$H_1^1 + H_1^1 \rightarrow D_1^2 + \beta^+ + \nu$, выделяется 0,46 *Мэв* энергии
$D_1^2 + H_1^1 \rightarrow He_2^3 + \gamma$, » 5,49 » »
$He_2^3 + He_2^3 \rightarrow He_2^4 + 2H_1^1$, » 12,85 » »

По мнению большинства ученых, именно этим способом наше светило вырабатывает подавляющую долю своего лучистого богатства. Вместе с тем в недрах Солнца идут и другие реакции — так называемого углеродного цикла.

Дело в том, что в составе солнечного вещества, видимо, присутствуют ничтожные примеси атомных ядер углерода с атомным весом 12. И они могут служить своего рода посредниками преобразования протонов в ядра гелия. Вот как разворачиваются события.

В среднем раз в 13 миллионов лет быстрый протон проникает в ядро углерода-12 и образует ядро азота-13, который приблизительно через 14 мин. претерпевает радиоактивный распад, излучая позитрон и нейтрино и превращаясь в ядро углерода-13. Примерно через 2,7 миллиона лет ядро углерода-13 захватывает второй протон, что приводит к возникновению устойчивого ядра азота-14. Это ядро в среднем раз в 32 миллиона лет способно захватить третий протон и преобразоваться в ядро кислорода-15, которое очень быстро (в среднем через 3 мин.) выбрасывает позитрон и нейтрино, чтобы превратиться в ядро азота-15. Наконец, 100 тысяч лет спустя ядро азота-15 захва-

тывает четвертый протон, выбрасывает ядро гелия и превращается в ядро углерода-12, с которого и началась вся цепочка реакций.

Записывается углеродный цикл так:

$C_6^{12} + H_1^1 \rightarrow N_7^{13} + \gamma$,	выделяется	1,95 *Мэв*	энергии	
$N_7^{13} \rightarrow C_6^{13} + \beta^+ + \nu$,	»	1,20	»	»
$C_6^{13} + H_1^1 \rightarrow N_7^{14} + \gamma$,	»	7,62	»	»
$N_7^{14} + H_1^1 \rightarrow O_8^{15} + \gamma$,	»	7,34	»	»
$O_8^{15} \rightarrow N_7^{15} + \beta^+ + \nu$,	»	1,68	»	»
$N_7^{15} + H_1^1 \rightarrow C_6^{12} + He_2^4$,	»	4,96	»	»

Внимательно приглядевшись к этой последовательности реакций, вы убедитесь, что углеродные ядра в ней не расходуются. Зато в результате цикла 4 протона превращаются в ядро гелия. Другими словами, энергетический итог получается точно такой же, как и в протонно-протонном цикле. Итог этот колоссален. Синтез каждого грамма гелия сопровождается выделением 175 тысяч *квт-ч* энергии.

Поддерживая огромную температуру в недрах светила, энергия ядерного синтеза не дает затухнуть порождающему ее грандиозному солнечному пожару и мощными лучистыми потоками вырывается наружу.

Надо подчеркнуть, что слияние атомных ядер в недрах Солнца имеет некоторое сходство с обыкновенным горением. Мы поджигаем спичкой кучу хвороста, и она пылает, пока не истлеет последняя ветка. На Солнце же «топливо» ядерное. Оно поджигается высокой температурой солнечных глубин, затем цепочками попарных ядерных взаимодействий захватываются большие массы вещества, выделяющаяся огромная энергия поддерживает высокую температуру, и «пожар» длится, пока не исчерпается все «горючее».

Такие процессы в физике именуются цепными термоядерными реакциями синтеза. Первая часть слова — «термо» означает, что реакция возбуждается действием теплоты, высокой температуры.

Вы можете спросить, как первоначально возник солнечный термоядерный пожар. Ведь не мог водород «гореть» вечно. Некоторые ученые так отвечают на этот вопрос.

Когда-то в далеком прошлом существовало облако холодной разреженной межзвездной материи. Постепенно под действием силы тяготения оно сгущалось, уплотнялось. Сжатие влекло за собой повышение температуры (по тому же закону, по которому нагревается воздух, сдавленный поршнем велосипедного насоса). Наконец, температура достигла многих миллионов градусов. Вот тогда-то и начал разгораться цепной термоядерный процесс синтеза гелия.

Кстати сказать, термоядерного горючего — водорода — на Солнце колоссальные запасы. И хватит его на срок, который невозможно себе даже представить: примерно на сто миллиардов лет! Добавим еще, что цепные термоядерные реакции синтеза (причем не только гелия, но и других элементов) — не редкость во Вселенной. Именно они дают лучистую энергию звездам. Именно от них берет начало длинная вереница энергетических преобразований, вливающих свет, тепло и жизнь во все существующее в природе.

ВОДОРОДНАЯ БОМБА

Когда наука разгадала секрет могущества Солнца, когда стали понятны термоядерные реакции, творящие в недрах звезд великое изобилие энергии, физики стали задумываться над практическим освоением открытых явлений. И первым подобием солнечных процессов на Земле был чудовищный взрыв водородной бомбы — самого страшного оружия из всех, какие знала история.

Что нужно иметь, чтобы искусственно воссоздать синтез легких ядер? Очевидно, прежде всего сверхвысокую звездную температуру, способную возбудить в веществе цепной термоядерный процесс.

Как только появилась атомная бомба, стало ясно, что она вполне может играть роль «спички», развивающей температуру в миллионы градусов.

А какие вещества она в состоянии «поджечь»? Учитывая, что высокая температура развивается взрывом атомной бомбы лишь на ничтожное мгновение — на миллионные доли секунды, физики провели ряд исследований и рекомендовали использовать в качестве термоядерного горючего изотопы водорода, а позднее — изотопы щелочного металла лития.

Простейшую схему водородной бомбы можно представить себе следующей. Вокруг запала, состоящего из обычной атомной бомбы, размещена смесь тяжелого и сверхтяжелого водорода (дейтерия и трития), заключенная в оболочку из урана. Когда запал взрывается, ядра изотопов водорода синтезируются в ядра гелия, выбрасывая нейтроны и порождая взрыв.

Вероятно, такой была схема установки, взорванной американцами осенью 1952 г. на атолле Эниветок в Тихом океане. Она пред-

ставляла собой громоздкое сооружение, собранное на высоком металлическом основании. Вес ее равнялся примерно 65 *Т*. Эта «взрывающаяся башня», по существу, не могла еще называться бомбой в общепринятом значении слова. Ее невозможно было перевезти, сбросить на цель. Первую водородную бомбу в подлинном значении этого слова создали ученые нашей страны. Она была испытана в 1953 г.

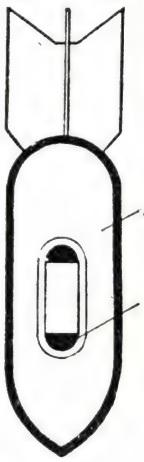


Рис. 2. Одна из возможных схем водородной бомбы

Есть у термоядерного оружия существенная особенность, делающая его еще более грозным, чем атомное. Мощность водородной бомбы, в отличие от урановой или плутониевой, можно повышать очень сильно, так как термоядерное горючее не взрывается само собой, без предварительного поджога.

Правда, радиус разрушения увеличивается с повышением мощности бомбы не слишком сильно — пропорционально кубическому корню мощности.

Как известно, урановая бомба, эквивалентная двадцати тысячам тонн тола, наносит главные разрушения примерно на километр вокруг центра взрыва. В тысячу раз более мощная водородная бомба (эквивалентная двадцати миллионам тонн тола) разрушает в радиусе не тысячи и не ста, а всего десяти километров. Конечно, и эта область поражения громадна, тем более, что смертельные ожоги могут происходить и на втрое большем расстоянии. Взрывом может быть сметен огромный город.

Совершенствование ядерного оружия ведет к созданию все более и более мощных водородных бомб. Дошло до того, что одна-две современные водородные бомбы могут уничтожить «все или почти все живое на территории немалого по размерам европейского государства» (из выступления А. А. Громыко на сессии Верховного Совета СССР 31 марта 1958 г.).

Но не только разрушениями и пожарами страшны термоядерные бомбы. Из многочисленных исследований явствует, что с каждым новым экспериментальным ядерным взрывом весь атмосферный воздух загрязняется губительными радиоактивными атомами. Попадая в воду, они отравляют рыбу. Осаждаясь на земной поверхности, они бесчисленными путями проникают в растения, в организмы животных, человека, создают возможность заболеваний крови, костной ткани. Особенно велика опасность для потомства. Радиоактивное излучение способно нанести серьезные поражения клеточкам, дающим начало новым живым существам, так что те рождаются порой чудовищными уродцами.

Вот почему так настойчиво звучат голоса разумных людей всего мира, призывающих к запрещению этого орудия массовой гибели. И в авангарде всенародного движения против смертельной ядерной угрозы стоит наша Родина. Твердо и последовательно борясь за мир, Советское правительство много раз ставило вопрос о запрещении атомных и водородных бомб, о прекращении их испытаний.

В сентябре 1959 г. во время исторической поездки в Соединенные Штаты Америки Председатель Совета Министров СССР Н. С. Хрущев от имени Советского правительства внес на рассмотрение Организации Объединенных Наций предложение о всеобщем и полном разоружении. Суть этого предложения заключается в том, чтобы в самые сжатые сроки, примерно в течение четырех лет, осуществить всеобщее и полное разоружение государств.

Это означает, что должны быть распущены все вооруженные силы, ликвидированы все вооружения, прекращено военное производство, окончательно и навсегда запрещено и уничтожено ядерное, химическое, бактериологическое и ракетное оружие.

В октябре 1959 г. Верховный Совет СССР обратился ко всем парламентам мира с призывом ко всеобщему и полному разоружению.

Предложение Советского Союза нашло большой положительный отклик во всех странах мира.

Сопротивляются разоружению лишь те круги капиталистических стран, которые на первый план ставят свои корыстные цели, которым чужды интересы и стремления народов.

Нет никакого сомнения, что настанет день, когда общественное мнение народов заставит замолчать маньяков атомного безумия. Угроза ужасов атомной войны, опасность вредоносных излучений, вызванных испытательными ядерными взрывами, уйдут в прошлое.

Однако это вовсе не значит, что человечество откажется от мощи термоядерной энергии. Ее солнечное могущество люди заставят служить делу созидания.

СУДЬБЫ ЭНЕРГЕТИКИ

В экономической жизни человеческого общества громадную роль играет энергия. Издавна ее главным источником служило органическое топливо земных недр — уголь, нефть, торф. Однако за столетия люди истратили значительную часть ископаемого горючего. Сегодня положение сложилось весьма серьезно: если уголь и нефть будут и впредь сжигаться столь же расточительно, как теперь, то всего через несколько десятилетий над человечеством нависнет угроза острого энергетического голода. Правда, еще немало рек ждет своего покорения, еще предстоит в широких масштабах освоить лучистые потоки Солнца, силу приливов, морского прибоя, тепло земных недр. Но многие из этих источников труднодоступны для техники. Недаром наибольшая доля мировой энергетики развивалась и развивается, базируясь именно на топливе. Как же спасти его от слишком быстрого уничтожения? Чем заменить его?

В последние годы начинает победное шествие энергетическое применение ядерного горючего — урана и тория. В ряде стран построены и строятся атомные электростанции. Это, бесспорно, отодвинет угрозу нехватки энергии. Однако надо помнить, что урана и тория в земной коре не так уж много. Если всю мировую энергетику перевести на такое «расщепляющееся» ядерное горючее, то при нынешних темпах роста потребления энергии его хватит лишь на 100—200 лет. За этот же период будут истреблены запасы угля и нефти.

Что же, значит, энергетический голод неотвратим? Нет! Никогда на Земле не будет нехватки топлива. Можно без всяких опасений строить новые электростанции на угле, нефти, газе, наращивать мощь тепловой энергетики. Для грядущих веков наука видит выход. И среди многих путей мирное освоение энергии ядерного синтеза, укрощение водородной бомбы — один из самых перспективных. Именно это должно влить жизнь в могучую технику будущего.

В мае 1955 г. президент Академии наук СССР А. Н. Несмеянов произнес знаменательные слова: «Настало время вместо использования жалких крох консервированной в том или ином виде на нашей планете колоссальной энергии Солнца создать свое солнце на Земле. Не правда ли, это звучит как фантазия? Но разве фантазия — электростанции, использующие ядерную энергию деления урана; двигатели на атомном горючем? Еще ближе мы подойдем к цели, когда сумеем получить управляемую реакцию, подобную реакциям, которые идут на Солнце. Тогда мы действительно создадим наше солнце на Земле».

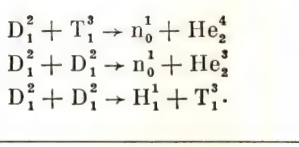
С высокой трибуны XX съезда КПСС акад. И. В. Курчатов говорил о проблеме искусственного солнца как о конкретной исследовательской цели: «Теоретические работы по атомной и ядерной физике,— отметил тогда советский ученый,— открыли возможность искать новый путь использования атомной энергии в мирных целях, открыли возможность экспериментального развертывания работ по осуществлению управляемых термоядерных реакций — реакций синтеза, или слияния, что является важнейшей, генеральной задачей науки».

На внеочередном XXI съезде КПСС задаче овладения управляемым термоядерным синтезом было посвящено почти все выступление И. В. Курчатова.

СУТЬ ПРОБЛЕМЫ

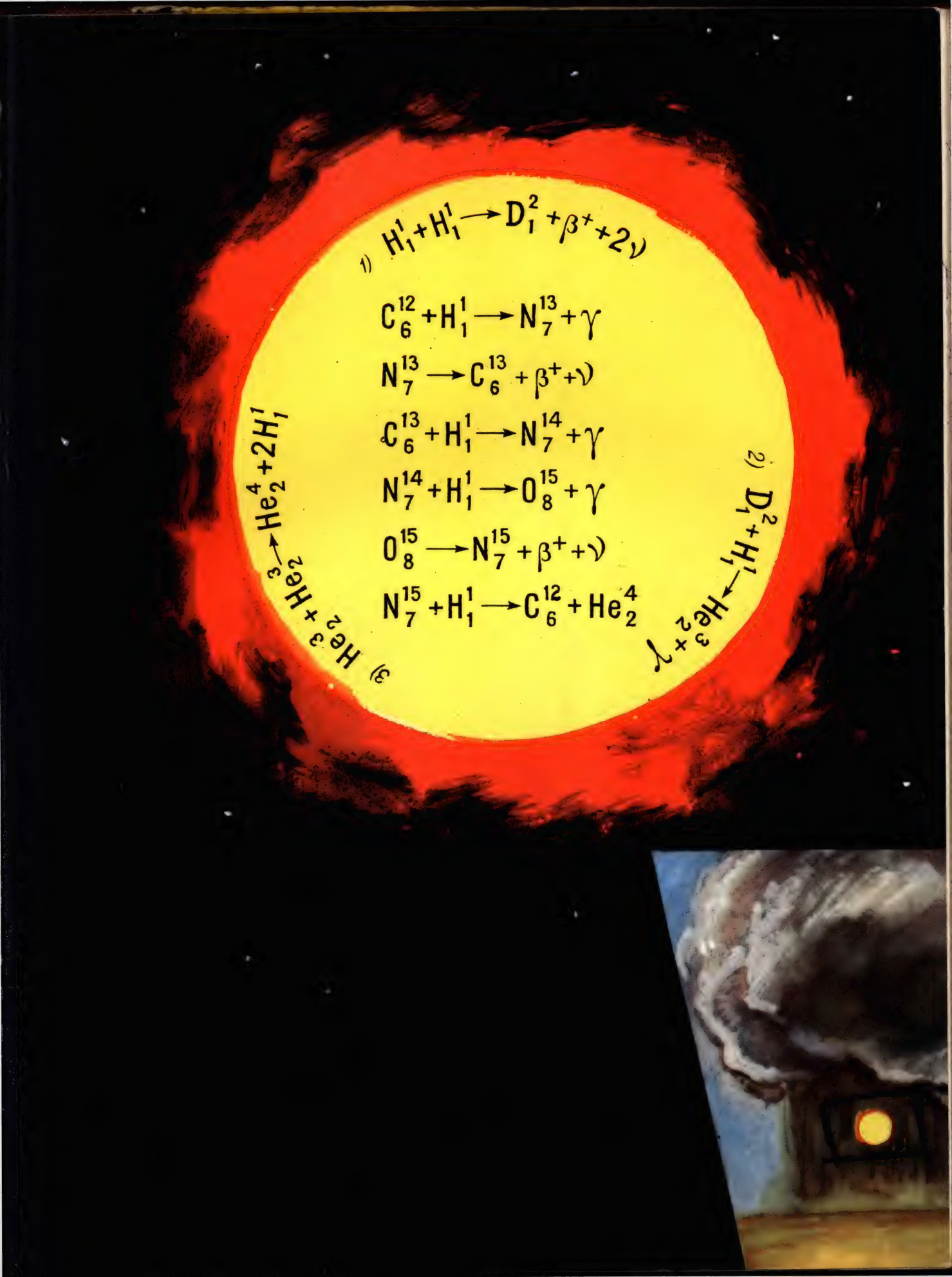
Суть проблемы, которую А. Н. Несмеянов назвал однажды «грандиозной по трудности и грандиозной по ожидаемому результату», понятна. Предстоит научиться возбуждать цепные термоядерные процессы без помощи атомной или какой-либо другой бомбы — в небольших, безопасных масштабах. Огромная выделяющаяся энергия тогда станет доступна контролю, регулированию и, стало быть, техническому освоению. Достичь такой цели — значит навсегда избавить человечество от угрозы нехватки энергии, ибо запасы веществ, доступных ядерному синтезу,— изотопов водорода — на Земле огромны.

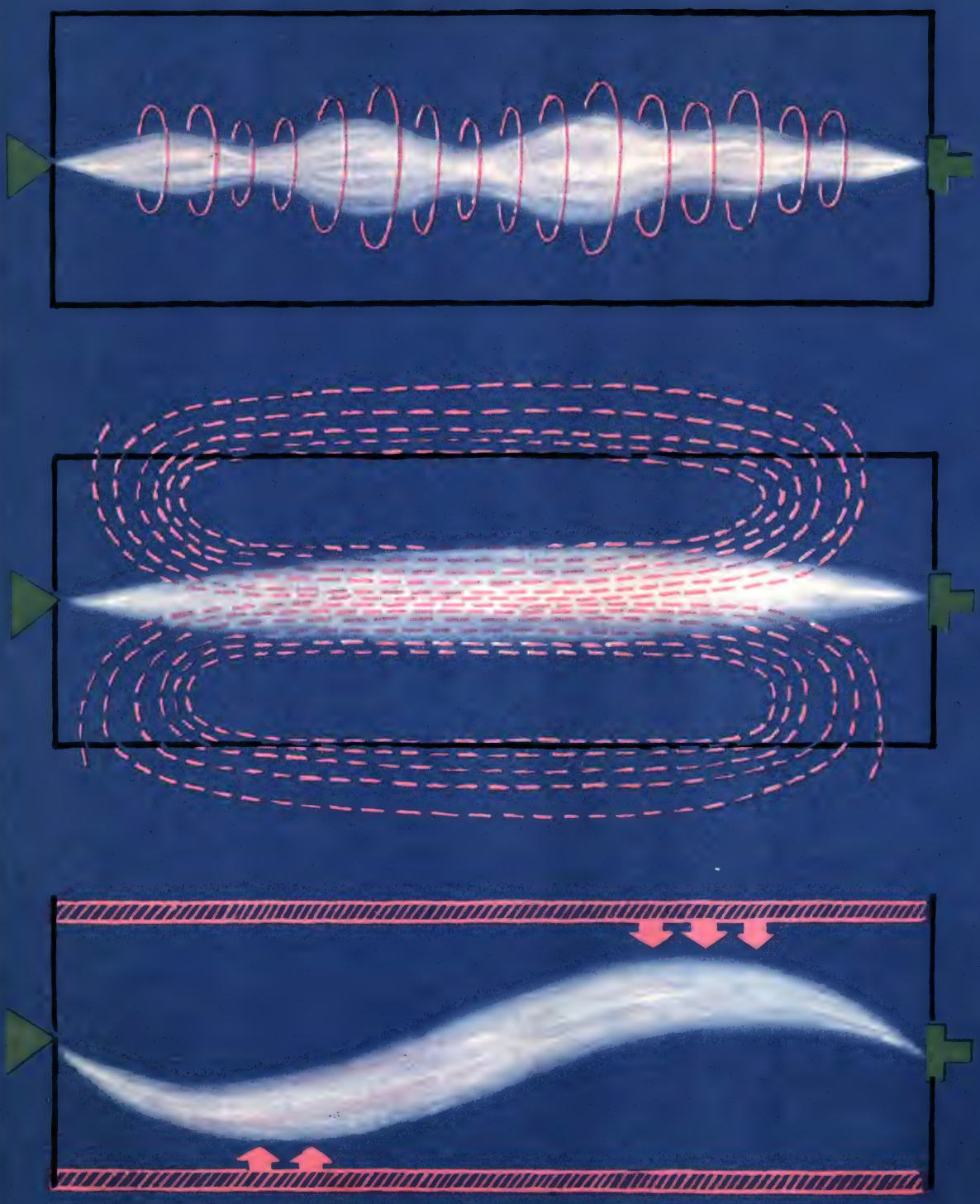
Между ядрами изотопов пойдут следующие реакции:



$$D_1^2 + T_1^3 \rightarrow n_0^1 + He_2^4$$
$$D_1^2 + D_1^2 \rightarrow n_0^1 + He_2^3$$
$$D_1^2 + D_1^2 \rightarrow H_1^1 + T_1^3.$$

Таблица 31. Ядерные реакции, идущие в недрах Солнца. По окружности написаны реакции протонно-протонного цикла, посередине — реакции углеродного цикла. Именно при этих реакциях освобождается гигантская солнечная энергия. Взрыв водородной бомбы — это мгновенная вспышка ядерного синтеза, похожая на те, что протекают в солнечных глубинах.


1) $H_1^1 + H_1^1 \rightarrow D_1^2 + \beta^+ + 2\nu$
$C_6^{12} + H_1^1 \rightarrow N_7^{13} + \gamma$
$N_7^{13} \rightarrow C_6^{13} + \beta^+ + \nu$
$C_6^{13} + H_1^1 \rightarrow N_7^{14} + \gamma$
$N_7^{14} + H_1^1 \rightarrow O_8^{15} + \gamma$
$O_8^{15} \rightarrow N_7^{15} + \beta^+ + \nu$
$N_7^{15} + H_1^1 \rightarrow C_6^{12} + He_2^4$
2) $D_1^2 + H_1^1 \rightarrow He_2^3 + \gamma$
3) $He_2^3 + He_2^3 \rightarrow He_2^4 + 2H_1^1$



к 400000000°!

Кроме того, вступят во взаимодействие синтезированные ядра легкого гелия, трития, водорода.

Физикам, взявшимся за решение грандиозной задачи мирного термоядерного синтеза, сразу же стали ясны основные условия ее успешного решения.

В реакторе ядерного синтеза термоядерное горючее нельзя использовать ни в твердом, ни в жидком виде. Годится лишь газ, причем чрезвычайно разреженный, находящийся под ничтожным давлением. В таком состоянии вещество при нагреве испускает меньше лучистой энергии и его значительно легче раскалить. Это весьма существенно, так как нагрев должен вестись до очень высоких температур. Как показали теоретические расчеты, в смеси равных частей тяжелого и сверхтяжелого водорода самоподдерживающийся процесс цепного термоядерного синтеза разгорится при 50 миллионах, а в чистом дейтерии — при 300—400 миллионах градусов. Наиболее выгодные («оптимальные») температуры этих реакций соответственно составляют 150 и 500 миллионов градусов (и то при условии, что «горючее» надежно задержано в какой-то «камере сгорания» и не «вытекает» оттуда).

Ни в каком твердом сосуде невозможно так сильно разогреть вещество. В подобном сосуде немыслимо и удержать его в нагретом состоянии. Однако наука уже довольно давно нащупала выход из этого, казалось бы, безвыходного тупика. Единственная возможность — применить для удержания и тепловой изоляции плазмы «сосуд» из магнитного поля. На эту возможность указали в 1950 г. советские академики И. Е. Тамм и А. Д. Сахаров.

Дело в том, что вещество, раскаленное до температур в сотни тысяч и миллионы градусов, уже не может состоять из обычных нейтральных атомов. При столь высоких температурах атомы сталкиваются друг с другом с такой силой, что не могут сохраниться в целости. Они вдребезги разбиваются, разделяются на более мелкие составляющие их частицы — атомные ядра и электроны. А эти «осколки» атомов, как известно читателю, вовсе не нейтральны. Они наделены электрическими зарядами: электроны — отрицательным, а атомные ядра — положительным. Смесь этих частиц, уже упоминавшаяся нами плазма, представляет собой весьма своеобразное состояние вещества. Она мало похожа на своего холодного собрата —газ. И основная особенность плазмы состоит в том, что она легко подвержена действию внешних электрических и магнитных полей.

Представьте себе, к примеру, что движущиеся электрически заряженные частички плазмы попадают в постоянное магнитное поле. Как только это произойдет, пути частиц тотчас изменятся — из прямых они станут искривленными, превратятся в отрезки спиралей и окружностей. И чем сильнее будет магнитное поле, тем круче искривятся пути частиц плазмы.

Если внешнее магнитное поле достаточно сильное, то оно способно вовсе не пропустить сквозь себя движущиеся электрически заряженные частицы. Каждая из них, откуда бы она ни летела, попав в такое поле, будет заворачивать назад. Вот почему магнитное поле может послужить для плазмы надежной преградой, своего рода непроходимой «стеной».

И физики придумали немало различных способов создания подобных магнитных «стен» с целью разогрева и тепловой изоляции плазмы.

Каковы же эти способы?

ПРЯМЫЕ ТРУБКИ

В 1956 г. увидели свет итоги обширных советских исследований раскаленной плазмы в прямых разрядных трубках. Эксперименты были выполнены в Институте атомной энергии Академии наук СССР под руководством академиков Л. А. Арцимовича и М. А. Леонтовича. Эти работы, отмеченные в 1958 г. Ленинской премией, увенчались выдающимся успехом. Газообразные изотопы водорода в лабораторных условиях с помощью мощных электрических разрядов удалось разогреть до миллиона градусов.

Как была взята эта первая вершина в походе науки за безопасную «термоядерную зажигалку»?

Представьте себе закрытую цилиндрическую трубку из фарфора или стекла. С обоих концов в нее ввели металлические электроды, самую трубку освободили от воздуха и затем наполнили ее разреженным дейтерием. Когда эксперимент

Таблица 32. Магнитные поля, укрепляющие плазменный разряд. Вверху—собственное магнитное поле разряда. Посередине—дополнительное магнитное поле, образованное постоянным током, текущим по обмотке, устроенной вокруг разрядной трубки. Внизу показано действие металлических стенок разрядной трубки, которые отталкивают шнур плазмы.

был подготовлен, электроды соединили с батареей конденсаторов, заряженной до 20—50 тыс.*в*. И в тот же миг на атомы газа обрушилось мощное электрическое поле. Оно вдребезги разбило атомы, сорвало с них электроны. В трубке возникла плазма, вещество, состоящее, повторяем, из осколков атомов — «голых» атомных ядер и электронов. Процесс нарастал лавиной. Все больше атомов разбивалось, все больше возникало ядер и электронов. Молниеносно развивался плазменный разряд.

Плазма, в отличие от обычного газа,— великолепный проводник. Поэтому через нее сразу же начал течь колоссальной величины (до миллиона ампер) электрический ток. Уже это одно повело к сильнейшему разогреву плазмы. Но повышение ее температуры было связано и с другим явлением.

Из школьных физических опытов читателю известно простое явление: если по какому-нибудь проводнику течет электрический ток, то вокруг него непременно возникает магнитное поле: стрелка компаса, поднесенного к такому проводнику, заметно отклоняется. Так бывает всегда — любой ток обязательно вызывает магнитное поле. Не представляет исключения, конечно, и ток плазменного разряда. Он также рождает собственное магнитное поле.

Но плазменный ток в нашей разрядной трубке чрезвычайно велик. Следовательно, наведенное магнитное поле довольно значительно. Его силовые линии как бы охватывают плазменный ручей эластичными колечками. Частицы плазмы, попав во власть этого поля, отклоняются от своего прямолинейного пути и очень быстро — со скоростью курьерского поезда — устремляются к оси трубки, к центральным областям потока плазмы.

Словом, поток плазмы под действием собственного магнитного поля резко сжимается, стягивается в тоненький шнурок. Происходит явление, которое физики называют «пинч-эффектом». Причем во время стягивания возникает неимоверная толчея движущихся и сталкивающихся частиц. Вблизи оси шнура она особенно велика. И именно благодаря этому нарастающему хаосу столкновений в шнуре происходит дальнейшее огромное повышение температуры — примерно до миллиона градусов.

Итак, магнитное поле, возникшее вокруг плазменного потока, не только сдавило плазму. Оно сыграло еще одну важную роль: послужило своеобразной теплоизоляционной стеной — невидимым чулком, который как бы запер внутри плазмы ее внутреннюю энергию, изолировал ее от окружающего холодного газа и стенок трубки, не дал ей сразу же уйти на стенки трубки, рассеяться.

Впоследствии советские физики усовершенствовали разрядные устройства, усилили нарастание тока в трубке и добились разогрева плазмы до температур в 3—4 миллиона градусов.

Правда, в прямых разрядных трубках высокая температура создается лишь на ничтожнейшие мгновения, измеряемые миллионными долями секунды. Звездный нагрев в таких устройствах возбуждается как бы очень резким и кратковременным ударом.

Подсчитано, что для эффективного освобождения термоядерной энергии он должен иметь мощность взрыва десяти тонн тола. Плазма же, «воспламенившись» от такого воздействия, отдала бы свою энергию синтеза еще более мощным взрывом. Поэтому в наши дни ученые пришли к выводу, что разряды в прямых трубках могут иметь лишь исследовательское значение.

Для практики, для будущих термоядерных реакторов надо искать более спокойную «зажигалку», в которой плазма «воспламенялась» бы осторожным, постепенным, медленным способом. Только при этом условии энергия термоядерного синтеза станет доступна техническому освоению.

БЕЗ ЭЛЕКТРОДОВ

Короткий срок жизни плазмы — неотъемлемая особенность процессов в прямых трубках. Заряженные частицы там мгновенно устремляются к электродам и уходят из разряда. Кроме того, из электродов в плазму попадают тяжелые атомы, которые загрязняют ее и сильно снижают ее температуру.

А нельзя ли осуществить плазменный разряд без электродов? Оказывается можно.

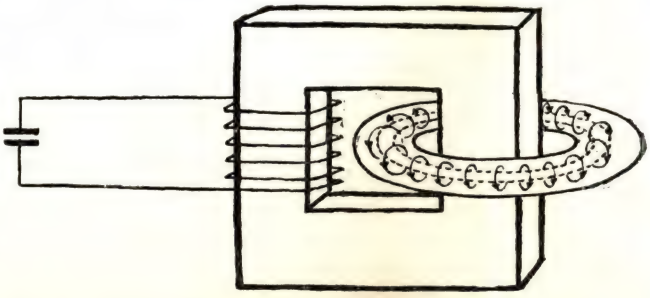


Рис. 3. Упрощенная принципиальная схема тороидальной камеры с железным сердечником для возбуждения кольцевых плазменных разрядов.

Читателю, наверное, знакомо простейшее электротехническое устройство — трансформатор. Его можно увидеть в любом радиоприемнике. И каждый знает, что первичная обмотка трансформатора, на которую подается преобразуемый переменный ток, не имеет никакого контакта со вторичной обмоткой, откуда снимается преобразованный ток. Переменный ток первичной обмотки создает переменное магнитное поле в железном сердечнике. А оно в свою очередь наводит переменный ток во вторичной обмотке, намотанной на тот же железный сердечник, что и первичная.

И вот возникла идея — попытаться устроить «термоядерную зажигалку» в виде трансформатора, в котором роль вторичной обмотки играло бы кольцо плазмы. Представьте себе (рис. 3) замкнутую круглую трубу в форме баранки — тор. В такой камере находится сильно разреженный газ. По поверхности эта баранка обвита первичной обмоткой. Тороидальная камера может быть выполнена как с железным сердечником, так и без него.

Как же действует установка? От батареи конденсаторов на первичную обмотку подается электрический импульс очень высокого напряжения, который наводит сильный ток в «витке» газа, заключенного в торе.

Плазменный ток течет там, не натыкаясь ни на какие электроды. Поэтому есть надежда получить гораздо более долговечный разряд, чем в прямых трубках, обеспечить благодаря этому более плавное нарастание силы разрядного тока, более спокойный режим подъема температуры.

К сожалению, практическое осуществление кольцевых плазменных разрядов натолкнулось на серьезные затруднения.

Шнур плазмы — весьма капризное детище физического эксперимента. В тороидальных камерах, где он должен жить сравнительно долго, это особенно опасно. Любое случайное утолщение шнура, пусть даже ничтожное, мгновенно раздувается, вызывает пульсации и выводит плазму из равновесия. Пагубно действуют и крохотные уменьшения толщины шнура.

Как же сделать плазменный поток устойчивее, прочнее? Физики решили «продернуть» вдоль шнура плазмы укрепляющие «нити», роль которых поручили сыграть силовым линиям дополнительного внешнего магнитного поля, направленного вдоль плазменного тока. Создать такое поле нетрудно: достаточно намотать на разрядную трубку еще одну проволочную катушку и пропустить через нее постоянный ток. Силовые линии внешнего магнитного поля укрепляют ручеек плазмы, делают его упругим и эластичным.

Правда, одно это не спасет разряд от скоропостижного разрушения. Ручей плазмы остается незастрахованным от длинных искривлений, когда, оставаясь однородным по толщине, он вдруг изогнется пологой дугой, коснется холодной стенки камеры и погибнет.

Однако физики нашли средство, уберегающее в какой-то мере и от такой неприятности. Разрядную трубку они предложили делать не из стекла или фарфора, а из толстого слоя металла. Металл — это своего рода тормоз для магнитного поля. Проникая в металлическую стенку, магнитное поле плазменного ручья преодолевает сопротивление ответных магнитных сил, которые возбуждаются вихревыми движениями электронов металла под «натиском» поля-«пришельца». Металл действует подобно рессоре, которая сжимает шнур со всех сторон и не дает ему удариться о стенку.

Оба способа укрепления разряда — дополнительное внешнее поле и металлические стенки — применяются в современных тороидальных камерах.

КАМЕРЫ-БАРАНКИ

Примерами подобных камер могут служить большая установка «Зэта» в Харуэлле (Англия), советские установки Института атомной энергии Академии наук СССР и «Альфа».

Правда, надежды, которые возлагала теория на «камеры-баранки», еще далеко не сбылись. Температура кольцевых разрядов пока гораздо ниже, чем прямых.

Что же наблюдается при экспериментах с камерами-баранками?

Во время экспериментов с тороидальными камерами физики обратили внимание на то, что раскаленная при кольцевом разряде плазма излучает нейтроны. Явление это привлекло особое внимание ученых, ибо именно нейтроны могут служить вестниками начавшейся термоядерной реакции слияния ядер тяжелого водорода в ядра легкого гелия. Один нейтрон при каждой такой реакции оказывается «лишним» и обретает свободу. А так как нейтроны не имеют электрического заряда, они без помех пролетают сквозь магнитное поле, окружающее плазму, и могут быть зарегистрированы специальными приборами. Надо

впрочем, сказать, что нейтронное излучение было зарегистрировано и в опытах с прямыми трубками, в частности в советских экспериментах 1952 г., о которых вы прочитали выше. Однако тогда ядра тяжелого водорода синтезировались, испуская нейтроны не из-за высокой температуры плазмы, а по другим причинам. То не были, так сказать, «термоядерные» нейтроны.

В тороидальных камерах наличие нейтронного излучения тоже не говорит еще о начавшемся термоядерном процессе. Вообще, несмотря на то что кольцевые разряды длятся в тысячи раз дольше, чем прямые, они получаются пока весьма нестойкими, быстро разрушающимися. Физикам предстоит еще много поработать, чтобы добиться устойчивости плазменных потоков в камерах-баранках.

МАГНИТНАЯ ЛОВУШКА

Мы знакомы уже с двумя путями нагрева плазмы до высокой температуры — в прямых разрядных трубках и в тороидальных камерах. В обоих случаях используется мощный электрический разряд. Под действием внешнего электрического поля частицы плазмы мчатся с большой скоростью и именно благодаря этому порождают собственное магнитное поле, которое сжимает поток плазмы и поднимает его температуру. Однако собственное магнитное поле плазменного разряда всё же не слишком велико. Очень нелегко заставить его достаточно сильно разогреть плазму и оградить ее от потери теплоты, от разрушения.

И ученые пришли к мысли попробовать отказаться от применения электрических разрядов, избавиться от услуг собственного магнитного поля плазменных потоков. Была поставлена цель: заранее заготовить прочный магнитный «мешок», впустить в него плазму, а затем каким-либо способом спокойно и плавно поднять ее температуру. У нас в стране эту идею высказал в 1953 г. чл.-корр. Академии наук СССР Г. И. Будкер. Устройства, предложенные им, получили название магнитных ловушек.

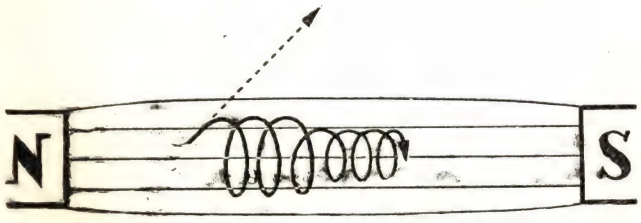


Рис. 4. Магнитное поле искривляет пути электрически заряженных частиц, заставляя их двигаться по кругам или спиралям. Усиление поля ведет к увеличению кривизны пути частиц.

Каков же принцип этих устройств?

Мы знаем уже, что в постоянном магнитном поле электрически заряженные частицы отклоняются от прямолинейного пути и начинают двигаться по окружности. И если, скажем, впустить заряженную частицу в постоянное магнитное поле, а затем резко усилить его, то круговой путь, по которому движется частица, сожмется, радиус окружности значительно уменьшится. Частица будет как бы захвачена магнитным полем (рис.4). То же произойдет, если не усиливать поле, а каким-либо способом раздробить впущенную в него заряженную частицу на осколки, тоже имеющие электрический заряд. Осколки, как более легкие, чем сама частица, будут сильнее заворачиваться магнитным полем и не смогут сразу выбраться наружу. На этих принципах и действуют магнитные ловушки.

Простейшая магнитная ловушка представляет собой камеру, в которой постоянным током, текущим по внешним обмоткам, создано цилиндрическое магнитное поле, резко усиленное на концах. Силовые линии поля располагаются там примерно так же, как волокна луковицы. Области усиленного поля именуются обычно «пробками».

Плазма впрыскивается в ловушку из какого-либо источника, а затем частицы ее захватываются в магнитный плен (либо усилением поля, либо диссоциацией, раздроблением заряженных частиц на более мелкие). Пойманная плазма на некоторое время задерживается в магнитной ловушке. Движение частиц, отражающихся от стенок и от «пробок», быстро делается совершенно беспорядочным, тем самым энергия впрыснутого потока преобразуется в тепло.

Правда, такие пробки не слишком надежно закупоривают ловушку. Многие частицы через них уходят наружу. Поэтому для возбуждения незатухающей термоядерной реакции в подобном устройстве требуются гораздо более высокие температуры, чем в «наглухо» запертой плазме. Отсюда вывод: надо стараться покрепче «запереть» ловушку. Физики предлагают для этого усилить запирающее действие пробок — областей усиленного магнитного поля — высокочастотными электромагнитными полями.

Когда плазма поймана в ловушку, можно надеяться разогреть ее еще сильнее, если, ска-

жем, ввести в ловушку магнитный «поршень» — продвинуть внутрь одну из пробок.

Плазма при этом сожмется, и температура ее резко повысится по тому же самому закону, по которому разогревается воздух, сжимаемый под поршнем дизельного двигателя. Только здесь поршень и цилиндр будут сделаны из невидимого и неощутимого материала — магнитного поля.

«ОГРА»

Летом 1958 г. в Институте атомной энергии закончено сооружение крупнейшей магнитной ловушки, получившей название «Огра» (рис. 5). Научное руководство ее созданием принадлежит лауреату Ленинской премии И. Н. Головину, а в постройке установки участвовало несколько коллективов инженеров и ученых.

«Огра» принадлежит к числу гигантов экспериментальной ядерной физики, которые в наши дни стали необходимым орудием в руках исследователей. Достаточно сказать, что максимальная энергия, потребляемая установкой, достигает 4 тыс. *квт*. Целая энергоподстанция обслуживает этот «прибор».

Камера «Огры» представляет собой большую (длиной 14 *м* и внутренним диаметром 1,5 *м*) трубу, в которой специальными насосами создается глубочайший вакуум — давление меньше миллионной доли атмосферного. Цилиндрическое, усиленное на концах магнитное поле создается наружными обмотками. При эксперименте в эту ловушку должны впрыскиваться из специального инжектора сильно ускоренные ионы молекул водорода. В ловушке они претерпевают различные столкновения и поэтому раскалываются на более мелкие атомные осколки, что, как отмечалось, ведет к захвату этих частиц в магнитный плен. Энергия впрыснутого потока и частицы его оказываются задержанными в ловушке. Подсчитано, что таким способом можно надеяться получить температуру в миллиард градусов. Правда, вследствие «вытекания» плазмы через пробки этого миллиарда едва хватит на возбуждение самоподдерживающегося термоядерного синтеза в смеси дейтерия с тритием. Для «воспламенения» же чистого дейтерия этого мало.

Сообщалось, что на «Огре» после наладки предполагается провести широкий комплекс исследований. Предстоит всесторонне проверить предварительные положения, которые предвидят немало «подводных камней». Решение проблемы управляемого термоядерного синтеза

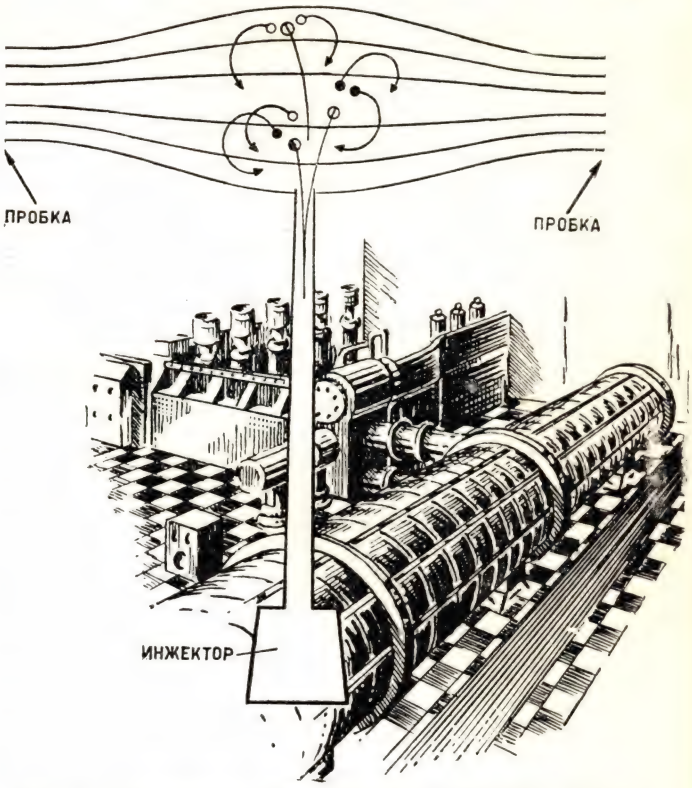


Рис. 5. Упрощенная схема действия установки «Огра»

вступило сейчас в такую фазу, когда дальнейшее движение вперед требует необычайно трудных опытов, очень сложных экспериментальных установок.

СОДРУЖЕСТВО УЧЕНЫХ

Сегодня мы не можем предугадать, какой «зажигалкой» будет подожжена первая промышленная термоядерная реакция. Научная разведка не отыскала пока направление главного удара. В предстоящих исследованиях физики всесторонне изучат многие возможности. О некоторых из них мы рассказали. Но есть и другие идеи.

Интересны, например, эксперименты с камерами, скрученными наподобие восьмерки, которые разработал видный ученый США Л. Спитцер. Немало надежд возлагается на овальные камеры, внутри которых создается своеобразное гофрированное магнитное поле. Много предложений высказывается для упрочения плазменных образований, для борьбы с их неустойчивостью.

Совершенствуются методы исследования горячей плазмы — определения ее формы, температуры, давления. Родилась даже новая наука — диагностика плазмы, которая изучает это необыкновенное вещество самыми разнообразными способами, вплоть до астрофизических.

Но не только физики заняты обузданием термоядерной реакции. Много дела у металлургов, химиков, специалистов по радиоэлектронике. Как отмечал И. В. Курчатов, термоядерные реакторы не могут быть созданы без настоящей революции в вакуумной технике. Предстоит научиться получать в больших объемах в тысячи и десятки тысяч раз более глубокое разрежение, чем это удается делать сейчас. Потребуются металлы небывалой чистоты, для выплавки которых надо разработать и освоить новые металлургические процессы. Необходимы электроизоляционные материалы высокой прочности, способные к тому же выдерживать интенсивное облучение нейтронами. Нужны, наконец, мощные высокочастотные электрогенераторы — приборы для коммутации сильных токов при высоком напряжении.

К решению всех этих задач направлен труд многих коллективов советских ученых и инженеров-практиков.

В недалеком прошлом все исследования управляемого ядерного синтеза были строго засекречены. Считалось, что если удастся построить термоядерный реактор, то он послужит не только источником энергии, но и установкой для получения ядерной взрывчатки (с помощью нейтронного излучения реактора). Однако наша страна выступила инициатором рассекречения этих исследований. Весной 1956 г. с разрешения правительства СССР И. В. Курчатов во время пребывания в Англии сделал перед физиками атомного центра в Харуэлле доклад о советских работах. И лед недоверия был в какой-то мере сломан. Вскоре Англия и США опубликовали результаты своих исследований. Вторая Женевская конференция по мирному использованию атомной энергии, состоявшаяся осенью 1958 г., вылилась в оживленное обсуждение учеными разных стран этой животрепещущей проблемы. После конференции состоялись взаимные посещения физиками советских и зарубежных институтов. Люди науки единодушно отметили большую пользу этого благородного сотрудничества.

Всех, конечно, интересуют сроки окончательного решения этой проблемы. Кое-кто из физиков пытался строить такие предположения. Назывались цифры: 10, 20, 50 лет. Однако обоснованные прогнозы пока вряд ли возможны.

«Я не беру на себя смелость делать предсказания о сроках освоения управляемой термоядерной реакции, — говорил И. В. Курчатов на внеочередном XXI съезде КПСС,— но я хочу заверить делегатов съезда, что советские ученые, инженеры и техники, работающие над задачей термоядерной энергетики, сделают все от них зависящее для решения этой важнейшей научно-технической проблемы».

К ТЕРМОЯДЕРНЫМ ЭЛЕКТРОСТАНЦИЯМ

Попробуем представить себе, как будет выглядеть термоядерная энергетическая установка будущего.

Прежде всего предостережем читателя от мечтаний о чем-то похожем на настоящее Солнце. Искусственные светила в виде спутников, парящих в небесах, наверное, не сойдут со страниц фантастических романов.

Первенец термоядерной энергетики будет, вероятно, скромной по виду электростанцией, может быть похожей внешне на прославленную АЭС под Москвой, которая летом 1954 г. открыла эру ядерной энергетики.

В термоядерном «котле» при температуре во многие миллионы градусов будет «гореть» смесь тяжелого и сверхтяжелого водорода. Горячая зона такого реактора (размером не меньше метра) будет испускать обильный поток лучистой энергии. Впрочем, количество излучения, несмотря на сверхвысокую температуру, не будет катастрофически огромным. Благодаря ничтожной плотности плазмы оно окажется примерно таким же, как у твердого тела, раскаленного до 5000 °. Да и светиться реактор будет не слишком сильно: лучистый поток изольется главным образом в форме невидимых ультрафиолетовых и рентгеновских лучей. Будет испускаться также очень много нейтронов, которые найдут полезное применение. Бомбардируя нейтронами блоки металла лития-6, размещенные вокруг реактора, удастся добывать новые и новые порции термоядерного горючего — трития. Так его можно будет получать даже больше, чем «сгорит» в термоядерном процессе. А лучистое богатство тем или иным способом станет преобразовываться в электрический ток (через посредство различных тепловых котлов и

турбин либо с помощью полупроводниковых батарей).

Весьма заманчив и другой метод отвода освобождающейся энергии — простой и вместе с тем удивительно эффективный. Его предложил в 1954 г. Г. И. Будкер. Речь идет о прямом превращении энергии термоядерного синтеза в электрический ток. Вот суть этого метода.

В реакторе атомные ядра изотопов водорода, набравшие в звездном жаре плазмы колоссальные скорости теплового движения, будут сталкиваться друг с другом и сливаться, освобождая дотоле спавшую в них гигантскую энергию. Освободившись, эта энергия в значительной мере передастся самим же атомным ядрам, которые из-за этого станут двигаться еще быстрее. Но частицы эти — электрически заряженные, а движение электрических зарядов обязательно порождает магнитное поле. Значит, возникновение мощной самоподдерживающейся термоядерной реакции повлечет за собой столь же мощную вспышку магнитного поля. При этом сама плазма расширится, охладится, и цепная термоядерная реакция в ней затухнет.

Представим себе теперь, что плазма заключена в магнитную ловушку. Мы частыми импульсами сжимаем плазму и тем самым возбуждаем пульсирующую термоядерную реакцию. Тогда в такт с импульсами из реактора станет вылетать магнитное поле, рожденное термоядерным синтезом. Преодолевая давление магнитного «мешка» ловушки, оно будет периодически вырываться из объема реактора.

«Поймать» это поле — значит уловить термоядерную энергию. И для этого вокруг реактора достаточно устроить проволочные обмотки. Вспышки магнитного поля, пересекая проводники обмоток, создадут в них пульсирующий электрический ток(по тому же самому закону, на котором действует любой современный электрогенератор).

Роль обмоток этого термоядерного электрогенератора может, разумеется, играть и та самая катушка, которая создает магнитную ловушку плазмы. Видите, как просто!

Этот метод, надо надеяться, будет осуществлен. Благодаря ему наше рукотворное солнце обещает принять форму установки, способной к прямому, непосредственному преобразованию энергии ядерного синтеза в электрический ток — без всяких промежуточных переходов энергии, как на обычных тепловых электростанциях (рис. 6).

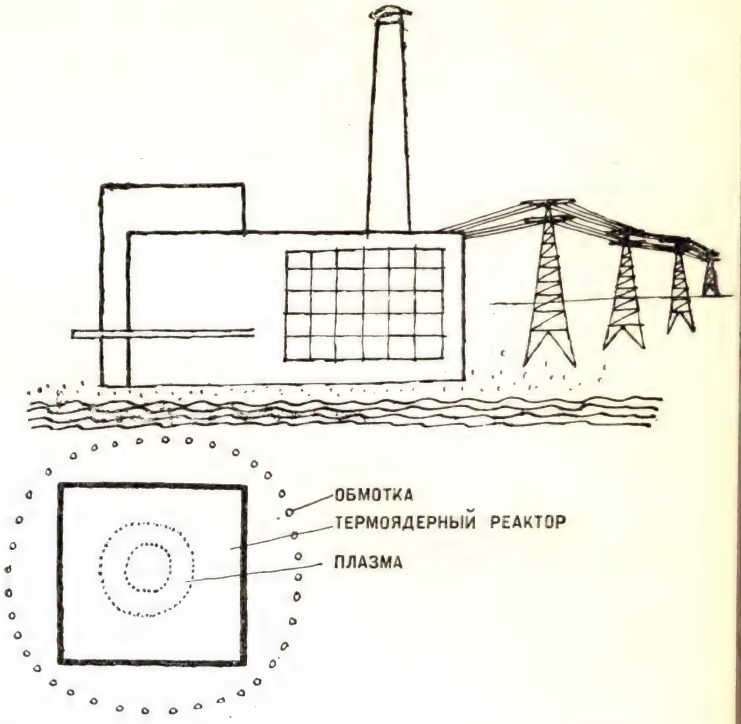


Рис. 6. Схема и возможный внешний вид электростанции с термоядерным реактором.

ВОДА — ТОПЛИВО БУДУЩЕГО

Природа не обидела людей звездным топливом. Более того, человек будет пользоваться самым эффективным термоядерным горючим — не обычным легким водородом, а его активными изотопами — дейтерием и тритием.

Сверхтяжелый водород добывается, как мы говорили, из металла лития, который, таким образом, приобретает репутацию важнейшего энергетического сырья. Именно тритий даст возможность строить термоядерные суда, самолеты, ракеты. И уже сейчас ученые думают над проектами термоядерных двигателей. Реакторы, работающие на чистом дейтерии, обещают быть более громоздкими и потому непригодными для использования на транспортных машинах. Зато для стационарных энергосиловых установок дейтерий послужит превосходным горючим. Ведь тяжелого водорода в распоряжении человека очень много. Он находится в составе самой обыкновенной воды. На каждые 6000 атомов легкого водорода воды приходится один атом дейтерия. И добыча дейтерия даже в наши дни не представляет больших трудностей. Для этого есть много способов. Даже сегодня мировое

производство дейтерия вполне обеспечило бы современную индустрию энергией, если бы мы уже умели «сжигать» тяжелый водород в термоядерных реакторах. А если сравнивать количества энергии, которые освобождаются при ядерном синтезе дейтерия и обычном сжигании угля, то придется сделать вывод, что сейчас по энергетической ценности получение дейтерия обходится дешевле, чем добыча угля.

Рис. 7. Дейтерий, содержащийся в двух стаканах воды, при ядерном синтезе способен освободить столько же энергии, сколько дает обычное сжигание 200 литров бензина!

Термоядерные электростанции на тяжелом водороде займут главенствующее положение в энергетике грядущих веков. Трудно привыкнуть к мысли, что это будут электростанции, для работы которых понадобится только вода. Одна вода — и ничего больше! И станции эти будут извлекать из воды поистине сказочную силу. Ведь преобразование в гелий грамма дейтерия сопровождается освобождением 100 тыс. *квт·ч* энергии. Тяжелый водород, извлеченный из двух стаканов воды, способен дать столько же энергии, сколько сжигание 200 литров (стандартной бочки) бензина (рис. 7).

Воды на нашей планете 1400 миллионов миллиардов тонн. В ней содержится 25 тыс. миллиардов тонн тяжелого водорода. Этого запаса человечеству хватит на сотни миллионов лет.

С появлением термоядерных электростанций на Земле начнется эпоха невиданного энергетического изобилия. Всюду, где есть вода, энергию можно будет добывать в совершенно неограниченных количествах. Отпадет необходимость в перевозке топлива, в передаче электрического тока на далекие расстояния. Уголь, нефть, торф целиком перейдут в ведение химиков. Расцветет могучая техника металлургии, машиностроение. Владея энергией, наши потомки станут полновластными хозяевами природы. Даже климат подчинится человеку. Поистине безграничные возможности ждут индустрию будущего, индустрию коммунизма.

Справочный отдел

Что читать по физике

Орлов В. О смелой мысли. М., Детгиз, 1954. 167 стр. (Школьная библиотека).

Вторая часть книги — «Большое в малом» — содержит ряд очерков о некоторых физических явлениях и их роли в жизни человека.

Перельман Я. И. Занимательная физика. Парадоксы, головоломки, задачи, замысловатые вопросы и рассказы из области физики. В двух книгах. М.—Л., Гостехиздат, 1949. Книга первая — 268 стр., книга вторая — 288 стр.

Писаржевский О. Навстречу великой мечте. М. Детгиз, 1959. 64 стр. (Путешествие в семилетку).

В брошюре рассказано о роли науки в выполнении семилетнего плана.

Соколова Е. Н. Юному физику. М., Учпедгиз, 1956. 256 стр. Примеры, вопросы, задачи, справочные сведения, описание простейших самодельных приборов по механике, молекулярному строению вещества, мерам и измерениям.

МЕХАНИЧЕСКИЕ ЯВЛЕНИЯ

Бублейников Ф. Д. О движении. Из истории механики. М., Детгиз, 1956. 212 стр. (Школьная библиотека).

В книге излагается история механики от древнейших времен до наших дней.

Добронравов Н. И. Беседа о колесе. М.—Л., изд-во Академии наук СССР, 1951. 52 стр. (Научно-популярная серия).

Брошюра о роли вращательного движения в технике.

Ивановский М. Законы движения. М., Детгиз, 1957. 128 стр. (Школьная библиотека).

В книге рассказано об основных законах механики и истории их открытия.

Игнациус Г. О загадках скорости. М., Детгиз, 1959. 64 стр.

Книга рассказывает о различных видах движения, о принципе относительности движения и объясняет ряд явлений, связанных с этим принципом.

Краснов А. И. Волчок и применение его свойств. М., Гостехиздат, 1958. 62 стр. (Научно-популярная библиотека). Брошюра знакомит со свойствами волчка, гироскопическими приборами в военной технике и навигации, успокоителем качки, проектом однорельсовой дороги.

Перельман Я. И. Занимательная механика. М.—Л., Гостехиздат, 1951. 172 стр.

Задачи, вопросы, головоломки и занимательные опыты, интересные примеры, охватывающие основные законы и понятия механики.

ПЛАВАНИЕ И ЛЕТАНИЕ

Артемьев И. Искусственный спутник Земли. М., Детгиз, 1958. 124 стр. (Школьная библиотека).

Книга знакомит с проблемой создания искусственных спутников Земли, с устройством и научным оборудованием первых советских спутников, с будущим астронавтики.

Артемьев И. Первый искусственный спутник Солнца. М., Детгиз, 1959. 64 стр. (Путешествие в семилетку).

Гильзин К. Путешествие к далеким мирам. М., Детгиз, 1956. 280 стр.

Книга посвящена проблеме межпланетных полетов. Она знакомит с механикой ракетного полета, современными достижениями ракетной техники и ее будущим — созданием внеземных станций, полетами на Луну и планеты.

Жабров А. А. Почему и как летает самолет. М., Гостехиздат, 1956. 56 стр. (Научно-популярная библиотека).

Брошюра знакомит с аэродинамикой, силами, действующими на самолет, с устройством и назначением основных частей самолета.

Казневский В. Аэродинамика в природе и технике. М., Учпедгиз, 1955. 127 стр. (Библиотека школьника).

Книга знакомит с основными понятиями аэродинамики — законами обтекания, сопротивлением воздуха, возникновением подъемной силы, особенностями аэродинамики больших скоростей.

Ляпунов Б. Открытие мира. Изд. 2-е. «Молодая гвардия», 1959. 208 стр.

Книга посвящена проблеме создания искусственных спутников и межпланетным путешествиям. В ней имеется также раздел об исследовании верхних слоев атмосферы с помощью ракет.

Меркулов И. А. Искусственные спутники Земли — торжество идей К. Э. Циолковского. М., изд-во «Знание», 1958. 72 стр.

Низе Г. Игры и научные развлечения М., Детгиз, 1958. 160 стр. (Для средней школы).

Опыты по механике, гидростатике, оптике, электричеству и другим разделам физики.

Путь в Космос. Материалы газеты «Правда» о трех советских искусственных спутниках Земли. М., изд-во «Правда», 1958. 320 стр.

В книге, помимо материалов о трех советских искусственных спутниках Земли, помещены данные о советских исследовательских ракетах.

Федоров Е. К. Научные исследования с помощью ракет и искусственных спутников Земли. М., изд-во «Знание», 1958. 32 стр.

СТРОЕНИЕ ВЕЩЕСТВА И РАБОТА ТЕПЛОВЫХ МАШИН

Верещагин Л. Ф. Высокие давления в технике будущего. М., изд-во Академии наук СССР, 1956. 36 стр. (Научно-популярная серия).

Иванов Ф. М. Вакуум. М., Гостехиздат, 1958. 56 стр. (Научно-популярная библиотека).

Брошюра о способах получения высоких степеней разрежения, о применении вакуума в электронике, атомной физике, для плавления металлов, в пищевой промышленности, для фильтрации жидкостей, улучшения качества бетона.

Китайгородский А. И. Порядок и беспорядок в мире атомов. Изд. 2-е. М., Гостехиздат, 1956. 140 стр.

Книга о молекулярном строении вещества, о трех агрегатных состояниях — твердом, жидком, газообразном; о кристаллических решетках; о процессах, происходящих при обработке материалов.

Китайгородский А. И. и Мезенцев В.А. Атом и молекула. М., Госкультпросветиздат, 1952. 79 стр.

Брошюра посвящена строению молекул и атомов, молекулярно-кинетическим свойствам материи, сущности химических и ядерных превращений.

Коваль В. Петя, я и атомы. Перевод с чешского. М., Детгиз, 1958. 72 стр. (Для младшего и среднего возраста).

Популярное изложение основных понятий о строении вещества — молекулах и атомах, периодической системе элементов, внутриатомной энергии и применении ее в технике будущего.

Левин М. Машина-двигатель. От водяного колеса до атомного двигателя. Л., Детгиз, 1957. 223 стр.

Книга знакомит с принципами устройства различных тепловых двигателей — от паровой машины до реактивного двигателя.

ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ ЯВЛЕНИЯ

Адирович Э. И. Электрический ток. М., Детгиз 1955. 72 стр. (Школьная библиотека).

Брошюра содержит популярное изложение физических основ электротехники — учения об электрических зарядах и токе,— способов получения электрического тока, устройства электродвигателей и генераторов.

Анфилов Г. Что такое полупроводник. М., Детгиз, 1957. 144 стр.

В книге объясняются свойства полупроводниковых материалов, рассказано об их получении и применении.

Белов К. П. Что такое магнетизм? М., Гостехиздат, 1955. 64 стр. (Научно-популярная библиотека).

Брошюра о природе магнетизма, магнитных свойствах вещества и их применении.

Бернштейн А. С. Термоэлектричество. М., Гостехиздат, 1957. 56 стр. (Научно-популярная библиотека).

Брошюра посвящена сущности и применениям термоэлектрического эффекта. В ней рассказано о применении термопар для измерения температуры пламени, расплавленного металла, планет и звезд, для регулирования температуры, о термоэлементах — генераторах тока — и о перспективах их применения.

Гладков К. Телевидение. М., Детгиз, 1955. 271 стр. (Школьная библиотека).

В книге излагаются физические основы передачи изображений на расстояние.

Зеликович Э. С. Свет и цвет. Беседы о значении, явлениях и природе света и цвета. М., Госкультпросветиздат, 1950. 120 стр.

Кушнир Ю. М. Невидимые лучи. М., Воениздат, 1952. 87 стр. (Научно-популярная библиотека).

Книга посвящена природе, свойствам, получению и применению невидимых ультрафиолетовых и инфракрасных лучей.

Коробко-Стефанов А. Звук за работой. М., Детгиз, 1957. 96 стр.

Книга рассказывает о природе слышимых и неслышимых звуков, а также об их применении в технике.

Луизов А., Теребинская Н. Свет без тепла. Л., Детгиз, 1958. 88 стр. (В помощь школьнику).

Книга рассказывает о явлении люминесценции и создании ламп «дневного» света.

Мезенцев В. Воздушные призраки. М.—Л., Детгиз, 1953. 80 стр.

Объяснение ряда оптических явлений в атмосфере—миражей, радуги, зеленого луча, гало и других, а также некоторых явлений природы, вызванных наличием в атмосфере электрических зарядов.

Плонский А. Ф. Пьезоэлектричество. М., Гостехиздат, 1956. 56 стр. (Научно-популярная библиотека).

Брошюра о сущности и использовании пьезоэлектрического эффекта для получения ультразвука, для звукозаписи, изучения вибраций, измерения давлений, ускорений и для других целей.

Плонский А. Как человек приручил волну. М., «Советская Россия», 1958. 224 стр.

Радиоэлектроника или рассказ об удивительных открытиях: о том, как человек приручил волну, о новом Аладине и его лампе, о том, как подслушали разговор звезд, о ста профессиях «мыслящей» машины и о многом другом.

Сена Л. А. Светящиеся трубки. М., Гостехиздат, 1956. 56 стр. (Научно-популярная библиотека).

В брошюре рассказано об особенностях протекания электрического тока в газах, о природе света, о явлении люминесценции и применении его в лампах «холодного» света.

Сухоруких В. С., Микроскоп и телескоп. Изд. 5-е. М., Гостехиздат, 1956. 64 стр. (Научно-популярная библиотека).

В брошюре рассказано, как устроены микроскоп и телескопы — линзовый, зеркальный и телескоп Максутова.

Теренин А. Н. Превращения энергии света. М., изд-во «Знание», 1957. 24 стр.

Популярная брошюра о природе света и его превращениях, на которых основаны разнообразные применения света — фотоэлектрический эффект, люминесценция, поглощение света молекулами и атомами, фотохимические процессы.

Честнов Ф. И. Радиолокация. Изд. 2-е. М., Гостехиздат, 1955. 64 стр. (Научно-популярная библиотека).

Брошюра знакомит с основами радиолокации, устройством и применением радиолокационных установок.

ЯДЕРНАЯ ЭНЕРГИЯ

Анфилов Г. Искусственное солнце. М., Детгиз, 1959. 240 стр. (Школьная библиотека).

Книга рассказывает о термоядерных реакциях и перспективах их практического применения.

Гладков К. Энергия атома. М., Детгиз, 1958. 400 стр. (Школьная библиотека).

История открытия ядерной энергии, устройство и применение ядерных реакторов, новые данные о строении вещества, перспективы применения атомной энергии в металлургии, на транспорте, для межпланетных сообщений, для получения электрического тока.

Лешковцев В. Атомная энергия. М., Гостехиздат, 1955. 64 стр. (Научно-популярная библиотека).

Брошюра знакомит со строением атома и атомного ядра, ядерными реакциями, рассказывает о путях получения и использования атомной энергии.

Масевич А. Г. История Солнца. «Молодая гвардия», 1955. 184 стр. Раздел «Что происходит в недрах Солнца» (стр. 120—143) посвящен источникам энергии звезд. В нем рассказано о термоядерных реакциях в природе.

Смагин Б. Голубое свечение. М., Детгиз, 1959. 32 стр.

Брошюра об открытии и разработке лауреатами Нобелевской премии П. А. Черенковым, И. Е. Таммом и И. М. Франком свечения, имеющего важное значение для развития физической науки.

ВЫДАЮЩИЕСЯ УЧЕНЫЕ-ФИЗИКИ

Анцелиович Е. С. Галилео Галилей, Учпедгиз, 1955.

Анцелиович Е. С. Леонардо да Винчи, Учпедгиз, 1955.

Аренберг А. Г. Генрих Герц. М., изд-во «Знание», 1957. 24 стр.

Болховитинов В. Александр Григорьевич Столетов (1839—1896). «Молодая гвардия», 1953. 512 стр. (Жизнь замечательных людей).

Веселовский И.Н. Архимед, Учпедгиз, 1957. 111 стр.

Дуков В. М. Петр Николаевич Лебедев. М., Гостехиздат, 1951. 110 стр. (Люди русской науки).

Кассиль Л. Человек, шагнувший к звездам. «Молодая гвардия», 1958. 48 стр.

Кубис Л. П. Э. Резерфорд. Учпедгиз, 1958. 83 стр.

Кудрявцев Б. Б. Михаил Васильевич Ломоносов. Его жизнь и деятельность, Изд. 2-е. М.—Л., Гостехиздат, 1950. 112 стр. (Люди русской науки).

Морозов А. А. Михаил Васильевич Ломоносов (1711—1765). «Молодая гвардия», 1955. 926 стр. (Жизнь замечательных людей).

Файнбойм И. Б. Эрнест Резерфорд. М., изд-во «Знание», 1958. 48 стр.

Шаховская Н. и Шик М. Майкл Фарадей. Повесть о жизни и трудах маленького переплетчика, ставшего великим ученым. М.—Л., Детгиз, 1947. 232 стр.

Указатель имен и предметов

А

Аберрация света — видимое смещение светила на небесной сфере, обусловленное сложением скорости движения Земли со скоростью света. Хроматическая А. вызывается различной преломляемостью цветных лучей. Сферическая аберрация происходит вследствие того, что лучи, параллельные оптической оси, но отстоящие от нее на различном расстоянии, фокусируются линзой в различных точках — 438, 446

Авогадро, Амедео (1776—1856) — итальянский физик. Ввел в науку понятие о молекуле. Сформулировал закон, носящий его имя — 359

Автоматизация — применение приборов, приспособлений и машин, позволяющих осуществлять производственные процессы без непосредственного участия человека и лишь под его контролем — 48

Адиабатический процесс — процесс, протекающий без теплообмена с окружающей средой — 381, 400, 527

Аккомодация глаза — изменение фокусного расстояния хрусталика глаза при рассматривании различно удаленных предметов — 440

Акустика — учение о звуке — 259

Акустическое давление — избыточное давление в слоях сжатия и разрежения при распространении упругой волны в газообразной среде, например в воздухе — 261

Альфа-частицы (α-лучи) — условное название дважды ионизированных атомов гелия. α-лучи наблюдаются при распаде ядер некоторых радиоактивных веществ; α-частица обладает атомным весом 4,003 и массой $6{,}644 \cdot 10^{-24}$ *г*. Она несет положительный заряд, вдвое больший заряда протона, и состоит из двух протонов и двух нейтронов, весьма сильно связанных между собой — 511

Амальгама — раствор металла в ртути — 433

Аморфный — не имеющий кристаллического строения — 365

Амплитуда — наибольшее отклонение какой-либо колеблющейся величины — 261

Амфибия — земноводное животное; по аналогии так называют тип самолетов, автомобилей, танков, приспособленных для движения по суше и воде — 285

Анаксимен (588—524 до н. э.) — греческий философ ионийской школы — 355

Ангстрем, Андерс (1814—1874) — шведский физик. Специалист в области спектроскопии. Издал большой атлас спектральных линий. Его именем названа единица длины: $1\,\text{Å} = 10^{-8}$ *см* — 362

Ангстрем — единица длины, равная одной стомиллионной доле сантиметра. Применяется для измерения малых размеров в микрофизике; обозначается Å — 362

Анероид — измеритель давления при помощи полой тонкостенной коробочки — 314

Анизотропия — неодинаковость свойств по различным направлениям — 366

Анод — положительный электрод — 460

Антинейтрон — нейтральная элементарная частица с массой, равной массе нейтрона. Спин равен 0,5, магнитный момент равен 1,913. Направление спина и магнитного момента у антинейтрона совпадают, а у нейтрона — противоположны — 405

Антипротон — отрицательно заряженная частица с массой, равной массе протона. Спин равен 0,5, магнитный момент равен 2,793, как и у протона, но направлены они противоположно — 405

Араго, Доминик (1786—1853) — французский физик, астроном. Предложил идею метода измерения скорости света, которую осуществили Фуко и Физо. Открыл способность электрического тока намагничивать железо — 438

Аристотель (384—322 до н. э.) — один из величайших мыслителей древности, ученик Платона. Влияние Аристотеля на развитие науки сказалось весьма пагубно в средневековье, когда его учение было провозглашено церковью непререкаемым — 355

Архимед (ок. 287—212 до н. э.) — древнегреческий математик и механик. Сочинения А.: «О рычагах», «Книга опор», «О шаре и цилиндре», «О спира-

лях», «О плавающих телах», «Об измерении круга», «О числе песчинок» и др. — 282, 434
Арцимович, Лев Андреевич (р. 1909) — советский физик-теоретик, академик. Наиболее известны работы по теории излучения в электронных ускорителях — 546
Атмосфера (техническая) — единица измерения давления, равная давлению 1 *кГ/см*²—375
Атом — наименьшая частица химического элемента — 357, 506
Ахроматические системы — специально подобранные оптические системы стекол; значительно уменьшают хроматическую аберрацию — 446
Аэродинамика — наука о движении воздуха и других газов и о воздействии газов на обтекаемые ими твердые тела — 293, 294

Баллистика — наука, изучающая движение брошенного тела (снаряда) в атмосфере Земли — 320
Барометр — измеритель атмосферного давления — 314
Бартолин, Эразм (1625—1698) — открыл свойство двойного лучепреломления света в кристаллах исландского шпата — 449
Беккерель, Анри (1852—1908) — открыл явления естественной радиоактивности (1896) — 453, 507, 529
Белл, Александр Грейам (1847—1922) — один из изобретателей телефона — 269
Бета-частицы (β-лучи) — условное название электронов, изучающихся при распаде ядер некоторых радиоактивных веществ — 511
Биение — периодическое усиление и ослабление звука при совместном звучании двух близких тонов —265
Бинауральный эффект — способность слухового аппарата определять направление на источник звука —264
Бойль, Роберт (1627—1691) — английский физик и химик. Открыл, независимо от Мариотта, закон, который гласит, что произведение давления газа на объем при неизменной температуре есть величина постоянная — 259, 356
Болометр — прибор для измерения энергии излучения — 416, 455
Бор, Нильс (р. 1885) — известный физик-теоретик. Высказал основные положения современного представления о строении атома — 517
Брадлей, Джемс (Брадли) (1693—1762) — астрономическим методом измерил скорость света, используя для этой цели аберрацию — 437
Бронза — сплав меди и олова — 433
Броун, Роберт (Браун) (1773—1858) — в 1827 г. открыл и объяснил непрекращающееся хаотическое движение мелких частиц, взвешенных в жидкости —360

Вакуум — состояние разрежения газа, заключенного в сосуде; высокий вакуум наступает тогда, когда путь частицы от одного столкновения до другого больше размера сосуда (давление меньше 10^{-3}—10^{-4}*мм* рт. ст.). Иногда также называют вакуумом свободное от вещества пространство — 237, 273,375
Векслер, Владимир Иосифович (р. 1907) — советский физик, академик, один из создателей синхрофазотрона — самого большого в мире ускорителя ядерных частиц — 239, 374
Вектор — графическое изображение физической величины, характеризующейся численным значением и направлением — 245
Вентиль — клапан для запирания потока — 502
Вибратор — прибор, являющийся источником колебаний — 272, 466
Вильсон, Чарлз Томсон Рис (р. 1869) — английский физик, изобретатель камеры для наблюдения траекторий элементарных частиц — 526
Волна — распространение колебаний в пространстве — 261, 377, 436
Высота звука — частота звуковых колебаний создаваемых источником звука — 263

Газодинамика— наука, изучающая движение газов и жидкостей в условиях, когда свойства сжимаемости имеют существенное значение — 294
Галилей, Галилео (1564—1642) — великий итальянский ученый — физик и астроном. Положил начало научному изучению законов движения. Открыл закон инерции, законы колебания маятника, оказал большое влияние на все последующее развитие науки — 236, 446
Галс — веревка, прикрепляющая нижний угол паруса; направление движения судна относительно ветра (правый галс — ветер дует справа) — 292
Гамма (в музыке) — последовательность тонов, входящих в интервал одной октавы (см.)—265
Гамма-лучи — условное название электромагнитного излучения с очень короткими длинами волн (от 1 ангстрема и меньше), возникающего при радиоактивном распаде — 511
Ган, Отто (р. 1879) — немецкий физикохимик. Совместно с Ф. Штрасман открыл деление ядер урана под действием нейтронов — 522, 533
Гассенди, Пьер (1592—1655) — французский философ, один из первых ученых-материалистов — 358
Гейгер, Ганс (1882—1945) — немецкий физик. Совместно с Э. Резерфордом изобрел прибор, обнаруживающий отдельные заряженные частицы — 516, 526
Гейзенберг, Вернер (р. 1901) — немецкий физик-теоретик, один из создателей квантовой механики—522
Гельмгольц, Герман (1821—1894) — немецкий естествоиспытатель, дал математическое истолкование закона сохранения энергии, разработал многие важные проблемы физики и физиологии — 256
Гераклит (530—470 до н. э.) — один из крупнейших греческих мыслителей. Его слова: «Нельзя два раза войти в одну и ту же реку»—выражают убеждение в непрерывной смене явлений в природе —355
Герике, Отто (1602—1686) — немецкий физик; опытным путем доказал существование атмосферного давления (опыт с магдебургскими полушариями)— 374
Герметический — закрытый наглухо, непроницаемый для воздуха — 345, 374

Герц, Генрих (1857—1894) — немецкий физик. Открыл явление фотоэффекта и впервые получил электромагнитные волны, теоретически предсказанные Максвеллом (см.) — 238, 431, 452, 455

Гетеродин — вспомогательное радиотехническое устройство, создающее электрические колебания высокой частоты — 480

Гидравлика — наука о законах движения жидкостей и о способах применения этих законов к решению практических задач — 294, 375

Гидролокатор — прибор, использующий ультразвук для обнаружения в воде инородных тел, например подводных лодок, косяков рыб и т. п.—274

Гидростатика — раздел механики жидкостей (гидромеханики), в котором изучается состояние равновесия жидкости под действием приложенных к ней сил — 280, 292

Гипероны — неустойчивые элементарные частицы с массой, бо́льшей, чем масса нейтрона, но меньшей, чем масса дейтона — 522

Гипотеза — научное предположение; физическая гипотеза, объясняющая какое-либо явление, подтверждается или опровергается опытом — 236

Гирогоризонт — прибор, определяющий положение самолета относительно горизонта — 313

Гирокомпас — указатель курса судна, использующий свойство волчка — 313

Гироскоп — тело, быстро вращающееся относительно оси симметрии — 313

Глубина фокусировки — расстояние между предметами, которые четко изображаются на сетчатке глаза или на фотографической пластинке — 440

Голос моря — инфразвук, возникающий в районе зарождения шторма —271

Горизонт — видимая линия пересечения небесного свода с земной поверхностью — 313

Гравитационная постоянная — коэффициент в формуле закона тяготения Ньютона, равный $6{,}67 \cdot 10^{-8}$ *см*^{3}/*г*·*сек*^{2}—249

Грамм-молекула — число граммов вещества, равное его молекулярному весу — 359

График — чертеж, изображающий посредством прямых или кривых линий количественные зависимости между различными физическими величинами —249

Громкость звука — психическое восприятие звука, зависящее от чувствительности уха, величины акустического давления и частоты звуковой волны—263

Гук, Роберт (1635—1703) — английский физик и ботаник. Открыл носящий его имя закон пропорциональности деформации приложенному усилию. Указал на клеточное строение растений — 359, 444

Гюйгенс, Христиан (1629—1695) — голландский оптик и математик, основоположник волновых представлений о природе света, создатель часов с маятником — 436

Д

Датчик — входная часть автоматического устройства, воспринимающая воздействие извне и осуществляющая непрерывное преобразование его в вид, удобный для передачи на другие части устройства —332

Дейтерий — тяжелый водород, у которого ядро атома — дейтон — состоит из протона и нейтрона — 542,552

Декарт, Рэне (1596—1650) — французский философ и математик. Ввел метод координат. Дал объяснение явлению радуги. Открыл свойства ряда кривых — 435

Демокрит (460—370 до н. э.) — древнегреческий философ, один из первых атомистов — 357

Детектор — прибор для обнаружения какого-либо физического явления. Наиболее широко известен детектор, обнаруживающий радиоволны — 460, 482, 497

Деформация — изменение относительного положения частиц тела под действием внешней силы —372

Джоуль, Джемс (1818—1889) — английский физик; экспериментально подтвердил закон сохранения энергии. Его именем названа единица работы в системе МКСА — 273, 413

Диаграмма — графическое изображение, показывающее соотношение величин — 397

Диамагнитный — выталкиваемый магнитным полем; диамагнитные свойства особенно ярко проявляются у висмута — 423

Диапазон — в музыке совокупность всех звуков от низшего до высшего предела данного голоса или музыкального инструмента — 474, 483, 489

Диафрагма (перегородка) — в оптических приборах непрозрачная пластинка с круглым отверстием переменного диаметра — 447

Динатронный эффект — испускание электронов поверхностью анода при его бомбардировке электронами, вылетающими с катода — 463

Диод — электронная лампа с двумя электродами; может быть использована как выпрямитель тока—459

Диполь (электрический) — два одинаковых по величине и противоположных по знаку электрических заряда, расположенных на некотором расстоянии. Магнитный диполь — магнитная стрелка — 410

Дисперсия — расхождение смешанных световых лучей разного цвета, например белого, при прохождении сквозь преломляющую среду — 444

Диссонанс — созвучия, содержащие близкие по частоте звуки. Совместное звучание создает биения, вызывающие неприятное ощущение — 265

Дифракционная решетка — прозрачная пластинка (или зеркало), на которую нанесены непрозрачные штрихи — 448

Дифракция — огибание волнами встречных препятствий, при котором происходит нарушение прямолинейности их распространения — 447

Диффузия — взаимное проникновение друг в друга физических тел, приведенных в соприкосновение— 374

Диффузор — часть канала трубы, в которой происходит замедление (расширение) потока и возрастание давления — 293

Диэлектрик — вещество, обладающее в обычных условиях очень малой электропроводностью — 413

Длина волны — расстояние между точками пространства, которое пробегает волна за время одного периода — 261, 436

Ж

Жолио-Кюри, Фредерик (1900—1958) — выдающийся французский физик, вместе с супругой Ирен Кюри

открыл искусственную радиоактивность, в том числе позитронную радиоактивность; первый президент Всемирной федерации научных работников и председатель Всемирного Совета Мира — 521, 524 532

ЖРД — жидкостный ракетный двигатель — 306

Жуковский Николай Егорович (1847—1921) — великий русский ученый, основоположник современной гидро- и аэромеханики. В. И. Ленин назвал Жуковского «отцом русской авиации» — 296, 308

И

Иваненко, Дмитрий Дмитриевич (р. 1904) — советский физик теоретик. Совместно с Е. Н. Гапоном сделал предположение о протонно-нейтронной структуре атомного ядра — 522

Изотермический — происходящий при неизменной температуре — 400

Изотопы — разновидности химического элемента, занимающие одну и ту же клетку периодической системы; имеют одинаковый заряд ядра, одинаковое строение электронной оболочки атомов, но разные атомные веса — 536

Изотропный — имеющий одинаковые физические свойства по разным направлениям — 366

Импульс — физическая величина, определяемая произведением силы на время ее действия — 253, 498

Индикатор — прибор для наблюдения за ходом какого-либо физического процесса — 397

Индукционная катушка — прибор для преобразования напряжения тока — 426

Индукция — электромагнитная — возникновение электрического тока в замкнутом контуре при изменении пронизывающего его магнитного потока — 424

Инерция — свойство тел сохранять состояния относительного движения или покоя — 247

Интервал звуковой — отношение частот колебаний двух тонов — 265

Интерференция — сложение в пространстве двух или нескольких волн, в результате чего получается усиление или ослабление амплитуды результирующей волны в зависимости от соотношения между частотами и фазами складывающихся волн—446

Интерферометр — прибор, использующий для физических исследований интерференцию света — 447

Инфразвук — звуковые волны, частота которых меньше 16 *гц* — 271

Инфракрасные лучи — невидимые лучи с длиной волны от 0,76 микрона до 0,5 *мм* — 452

Инфузория — один из видов простейших микроорганизмов — 444

Ионосфера — верхняя часть земной атмосферы, состоящая из ионизованного газа и электронов. Начинается на высоте 70 *км* и простирается до 400 *км* и выше — 469

Ионы — электрически заряженные частицы. Образуются при потере или приобретении электронов атомами или молекулами — 411, 416, 470, 527

Иоффе, Абрам Федорович (р. 1880) — советский физик, академик. Один из создателей теории полупроводников — 501

К

Кавендиш, Генри (1731—1810) — английский физик. Определил постоянную в законе тяготения. Много и плодотворно занимался химическими исследованиями, в частности, определил состав воды — 249

Кавитация — процесс, при котором происходит резкое возрастание давления в некоторых точках движущейся жидкости вследствие «захлопывания» пустот, образующихся при ее разрежении — 275

Карданный подвес — шарнирное устройство, позволяющее сохранять неизменным положение тела при любых поворотах системы — 313

Карно, Сади (1796—1832) — французский инженер. В работе «Размышления о движущей силе огня» высказал основное положение термодинамики о том, что работу можно получить за счет запаса тепла при переносе его от нагретого тела к более холодному — 401

Квант энергии — строго определенное количество энергии, которое поглощает или излучает атом—456,541

Кварта — интервал звуков при отношении частот 3 : 4—265

Квинта — интервал звуков при отношении частот 2 : 3—265

Кельвин (Томсон), Уильям (1824—1907) — английский физик, вел выдающиеся исследования в области термодинамики, электричества; сделал ряд важных изобретений — 380

Кенотрон — двухэлектродная вакуумная лампа с накаливаемым катодом, применяемая для выпрямления переменного тока — 496

Кибернетика — наука о связи управления и контроля в машинах и живых организмах — 499

Кинескоп — электронно-лучевая трубка, воспроизводящая сигналы, поступающие от передатчика —486

Кинетическая энергия — энергия движения — 256

Клистрон — сверхвысокочастотная электронная лампа; применяется в качестве генератора, усилителя и умножителя частоты — 476

Коагуляция — объединение мелких частиц в более крупные под влиянием сил сцепления — 275

Коаксиальный кабель — двухпроводная линия, в которой один провод проложен внутри другого, имеющего форму трубки — 486

Когерентные волны — волны, совершающие колебания с постоянной разностью фаз — 447

Кокрофт, Джон Дуглас (р. 1897) — английский ученый, специалист в области ядерной физики. Директор Исследовательского центра в Харуэлле — 520, 530

Колеоптер — вертикально взлетающий самолет с кольцевым крылом. Зазор между крылом и корпусом используется в качестве прямоточного двигателя. Колеоптеры обладают большой скороподъемностью, но их аэродинамическое качество ниже, чем у самолетов с плоскими крыльями — 317

Конвертоплан — самолет, воздушный винт которого можно поворачивать на 90°. При взлете винт ставится в вертикальное положение, а при переходе на горизонтальный полет поворачивается параллельно оси машины. У некоторых конструкций подвижно все крыло с винтомоторной установкой—317

Конфузор — часть трубы, в которой при плавном сужении происходит ускорение потока газа или жидкости и падение давления — 293

Корпускула — собирательное название для мельчайших частиц вещества — 470

Космические лучи — непрерывно падающий из мирового пространства на Землю поток частиц, в основном протонов, весьма высокой энергии — 236, 346. 526

Коэффициент — числовой множитель при буквенном выражении или постоянный множитель при переменной величине — 299, 399

Кристалл — твердое тело, имеющее естественную форму многогранника — 365, 497

Кристаллография — наука о строении и свойствах кристаллов — 366

Критический — численное значение величины, при котором изменение состояния происходит скачком — 536

Крукс, Вильям (1832—1919) — английский физик и химик. Известен своими исследованиями катодных лучей. Открыл элемент таллий. Изобрел спинтарископ, трубки для наблюдения разряда и т. д.—512

Крылов, Алексей Николаевич (1863—1945) — академик; крупнейший русский кораблестроитель, математик, механик; Герой Социалистического Труда. Перевел «Математические начала натуральной философии» Ньютона на русский язык — 290

Кулон, Шарль Огюстен (1736—1806)— французский физик. Открыл законы взаимодействия точечных электрических зарядов и магнитных полюсов. Исследовал причины трения — 407, 516

Курчатов, Игорь Васильевич (р. 1903) — крупнейший советский физик,академик;сделал фундаментальные открытия в области ядерной физики; директор Института атомной энергии АН СССР—543, 545, 550

Кюри, Пьер (1859—1906), и Кюри-Склодовская, Мария (1867—1934) — французские физики, открывшие радий, полоний и другие радиоактивные вещества и их свойства — 424, 509

Л

Ланжевен, Поль (1872—1946) — французский физик. Известен исследованиями в области магнитных явлений. Впервые использовал кварц для излучения и приема ультразвуковых волн — 272, 424

Лауэ, Макс (р. 1879) — немецкий физик-теоретик. В 1912 г. для доказательства волновой природы рентгеновских лучей предложил опыты по обнаружению дифракции на кристаллах — 453

Лебедев, Петр Николаевич (1866—1912) — выдающийся русский физик. Впервые обнаружил и измерил давление света — 353, 452

Левенгук, Антони (1632—1723) — голландский натуралист. При помощи изобретенного им микроскопа обнаружил в капле воды инфузории — 444

Ленц, Эмилий Христианович (1804—1865) — физик, член Российской академии наук — 425

Леонардо да Винчи (1452—1519) — великий итальянский художник. Был также инженером, врачом, естествоиспытателем — 440

Леонтович, Михаил Александрович (р. 1903) — известный советский физик-теоретик, академик — 546

Линза — прозрачное тело, ограниченное правильными поверхностями (сферическими). Например, естественной линзой является хрусталик глаза — 442

Локатор — прибор для определения местоположения тела при помощи отраженных от него радио- или ультразвуковых волн — 477, 487

Ломоносов, Михаил Васильевич (1711—1765) — великий русский естествоиспытатель, философ и литератор. Своими исследованиями в различных областях знаний заложил основы науки в России — 256, 259, 358, 391, 441, 443, 472

Лоренц, Гендрик Антон (1853—1928) — голландский физик; создатель электронной теории и электродинамики движущихся сред. Найденные им преобразования координат и времени равномерно движущихся систем отсчета явились фундаментом теории относительности — 258

Лукреций Кар (99—55 до н. э.) — римский поэт-философ, автор поэмы «О природе вещей» — 357

Люминесценция — свечение вещества при поглощении им видимых или невидимых лучей — 456

Люминофоры — вещества, излучающие свет под действием видимых или невидимых лучей — 479, 496

М

Магнетрон — электронная лампа, в которой взаимодействие электродов с высокочастотным электрическим полем происходит в перекрещивающихся постоянных электрическом и магнитном полях — 477

Магнитострикция — изменение геометрических размеров магнитных тел: железа, никеля и др.— при их перемагничивании — 273

Майер, Юлиус Роберт (1814—1878) — немецкий ученый, одним из первых сформулировавший закон сохранения и превращения энергии — 256

Майкельсон, Альберт (1852—1931) — американский физик. Известен точными измерениями скорости света — 439

Максвелл, Джемс Клерк (1831—1879) — английский физик. Получил мировую известность созданием электромагнитной теории света — 238, 425, 430, 451, 467

Мандельштам, Леонид Исаакович (1879—1944) — выдающийся советский физик, академик. Известен своими исследованиями в оптике, теории колебаний и радиофизике — 454

Манометр — прибор для измерения давления газов и жидкостей — 294, 393

Мариотт, Эдм (1620—1684) — французский физик. Независимо от Бойля вывел закон, показывающий зависимость объема газа от давления при неизменной температуре — 259

Мезоны — неустойчивые элементарные частицы, как заряженные, так и нейтральные — 405

Мембрана — упругая пластинка — 269, 481

Менделеев, Дмитрий Иванович (1834—1907) — великий русский химик; создатель периодической системы элементов — 507

Метацентр — для симметричного тела — точка пересечения направления выталкивающей силы с плоскостью симметрии тела — 289
Метеориты — железные или каменистые тела, падающие на Землю из межпланетного пространства — 340, 347
Миделевое сечение — наибольшее по площади поперечное сечение удлиненного тела, например корпуса судна, фюзеляжа самолета — 297, 299
Микрокосмос — мир атомов и элементарных частиц — 506
Микроскоп — оптический прибор с системой сильно увеличивающих стекол для рассматривания предметов, невидимых невооруженным глазом — 444
Микрофон — прибор, преобразующий звуковые колебания в электрические — 481
Модуляция — процесс «наложения» на радиоволны колебаний более низких частот (например, соответствующих частотам человеческого голоса) — 481
Молекула — наименьшая частица данного вещества, обладающая его основными химическими свойствами — 358, 505
Монохроматический — одноцветный (свет) — 445

Н

Нейтрон — одна из основных частиц, образующих ядро атома, не обнаруживающая ни положительного, ни отрицательного электрического заряда. Масса нейтрона $1{,}6747 \cdot 10^{-24}$ г — 405, 522
Нуклон — общее название частиц (протонов и нейтронов), входящих в состав атомного ядра — 523
Ньютон, Исаак (1643—1727) — великий английский физик и математик, основоположник классической физики — 237, 435, 443

О

Обертон — верхний тон. Тон звука, сопутствующий основному тону, но большей частоты — 263
Обыкновенный луч в кристалле — один из двух лучей (при двойном лучепреломлении), скорость которого не зависит от направления распространения — 449
Объектив — линза (или их система) в оптическом приборе, обращенная к предмету — 443
Октава — звуковой интервал при отношении частот 1 : 2 — 265
Окуляр — линза (или их система) в оптическом приборе, обращенная к наблюдателю — 443
Ом, Георг (1787—1854) — немецкий ученый. Известен исследованиями в области электричества — 415
Оптика — отдел физики, изучающий свойства света — 442, 450
Оптическая ось кристалла — направление, вдоль которого не происходит двойного лучепреломления — 449
Оптическая плотность — численное значение абсолютного показателя преломления — 439
Орбита — путь движения небесного тела — 326
Остойчивость — способность судна возвращаться в положение равновесия — 288
Осциллограф — электрический прибор для регистрации и наблюдения различных физических процессов — 333

П

Парамагнитные тела — тела, ориентирующиеся вдоль направления магнитного поля — 423
Параметр — величина, характеризующая то или иное свойство процесса — 330, 392
Пара сил — две равные и параллельные силы, приложенные к разным точкам тела и направленные в противоположные стороны — 249
Паскаль, Блез (1623—1662) — французский физик, математик и философ. Известен исследованиями жидкостей и газов. Установил ряд закономерностей, носящих его имя — 259, 280
ПВРД — прямоточный воздушно-реактивный двигатель — 309, 311
Пентод — пятиэлектродная электронная лампа — 498
Период — промежуток времени, в течение которого повторяющийся процесс протекает от начала до конца — 395, 513
Период дифракционной решетки — расстояние, равное ширине светлого и темного промежутков — 448
Перпетуум-мобиле — вечный двигатель — 394
Пирометр — вид прибора для определения температуры тела — 445
Плазма — в физике полностью ионизованный газ, состоящий из хаотически движущихся положительно и отрицательно заряженных частичек — 546
Планк, Макс (1858—1947) — выдающийся немецкий физик. Исследования законов теплового излучения привели его к квантовой теории излучения — 518
Пластический — способный принимать под давлением любую форму, не ломкий — 372
Позитрон — положительная элементарная частица, имеющая массу электрона — 526
Поляризованный свет — свет, у которого плоскость колебаний вдоль направления распространения в оптически однородной среде неизменна — 450
Поляриметры — прибор для измерения степени поляризации света, а также вращения плоскости поляризации — 451
Понтон — полое тело, применяемое для быстрого наведения переправ и подъема затонувших судов — 289
Попов, Александр Степанович (1859—1905) — русский ученый, изобретатель радио — 238, 270, 457, 459
Потенциал — величина, определяемая работой сил поля — 411
Потенциальная энергия — энергия тела, определяемая его положением относительно других тел — 361
Поток энергии — энергия, переносимая волной в направлении распространения через единицу поверхности в единицу времени — 262
ПРД — пороховой ракетный двигатель — 311

Предельный угол — угол падения, при котором преломленный луч скользит вдоль границы раздела сред — 440

Призма — многогранник с двумя равными и параллельными гранями — основаниями и боковыми гранями — параллелограммами — 445

Призма Николя — прибор для преобразования естественного света в поляризованный — 451

Протон — одна из основных частиц, образующих ядро атома; масса протона $1{,}6724 \cdot 10^{-24}$ г, положительный заряд $4{,}8 \cdot 10^{-10}$ CGSE — 405

Пьезоэлектрический эффект — появление электрических зарядов на поверхности некоторых кристаллов при их деформации — 272, 347, 413

Радиация — излучение — 502

Радиоактивность — самопроизвольный распад ядер атомов некоторых элементов, сопровождаемый излучением элементарных частиц и фотонов — 510

Радиорелейные линии связи — вид связи, осуществляемой рядом приемно-передающих радиостанций; промежуточные станции называются ретрансляционными — 483

Радиоэлектроника — область техники, использующая вакуумные и полупроводниковые приборы — 486, 489

Ракета — летательный аппарат с реактивным двигателем, использующим горючее и окислитель, находящиеся на самом аппарате — 245, 247, 250, 319, 348

Растр — система линий, нанесенных в определенном порядке на какую-либо поверхность — 487

Реактивный двигатель — двигатель, преобразующий химическую энергию топлива в кинетическую энергию газовой струи. При этом двигатель с летательным аппаратом приобретает скорость в обратном направлении — 304, 310, 318, 320, 336, 341

Резерфорд, Эрнест (1871—1937) — крупнейший английский физик, известный своими открытиями в области ядерной физики — 511, 516, 518

Резонанс — явление резкого увеличения амплитуды вынужденных колебаний при совпадении собственной частоты колеблющегося тела с частотой действия внешней силы — 273, 465, 488

Рекомбинация — преобразование ионов в электрически нейтральные атомы и молекулы путем присоединения или отдачи электронов — 416

Релятивистская механика — механика, учитывающая законы теории относительности — 258

Реле — прибор, определенным образом реагирующий на нарушение заданного режима процесса — 483

Рёмер, Олаф (1644—1710) — датский астроном. Впервые определил величину скорости света — 437

Рентген, Вильгельм Конрад (1845—1923) — немецкий физик, открывший коротковолновое электромагнитное излучение — рентгеновские лучи — 453

Рентгеновские лучи — электромагнитные волны длиной от 0,06 до 20 ангстремов, получаемые при бомбардировке электронами катода в специальной вакуумной трубке — 363, 453

Рефрактометр — прибор для измерения показателя преломления света в данном веществе — 435

Сегнетова соль — двойная калиево-натриевая соль винной кислоты. Кристаллы этой соли обладают пьезоэлектрическими свойствами — 413

Сила звука (интенсивность звука) — пропорциональна квадрату акустического давления — 262

Синхрофазотрон — установка для ускорения заряженных частиц, в которой частицы ускоряются электрическим полем нарастающей частоты и движутся в магнитном поле с возрастающей напряженностью — 239, 374

Скобельцын, Дмитрий Владимирович (р. 1892) — советский физик, академик. Автор ряда исследований в области атомного ядра и космических лучей — 528

Снеллиус, Виллеброрд (1580—1626) — голландский естествоиспытатель. Аналитически выразил закон преломления света независимо от Декарта — 435

Спектральный анализ — физический метод качественного и количественного анализа вещества путем изучения его спектра — 449

Спектроскоп — прибор для наблюдения спектров — 449

Спидометр — прибор, измеряющий скорость движения самодвижущихся машин — 313

Спинтарископ — прибор для наблюдения α-частиц по вспышкам света, возникающим при ударах частиц об экран из сернистого цинка — 512

Стевин, Симон (1548—1620) — нидерландский физик и инженер. Известен своими работами в области механики жидкостей и в математике. Дал новое доказательство закона равновесия тел на наклонной плоскости — 281

Столетов, Александр Григорьевич (1839—1896) — русский физик. Исследуя фотоэлектрические явления, сформулировал законы фототока. Предложил метод измерения индукции магнитного поля — 424, 455

Супергетеродин — вид радиоприемника, в котором частота радиосигнала сначала преобразуется в сигнал более низкой, «промежуточной» частоты, а затем усиливается — 480

Сцинтилляция — кратковременная вспышка света, производимая отдельными заряженными частицами при их поглощении в среде — 519

Тамм, Игорь Евгеньевич (р. 1895) — советский физик, академик, лауреат Нобелевской премии. Разработал совместно с И. М. Франком теорию излучения быстро движущегося в среде электрона — 545

Тахометр — прибор для измерения угловой скорости (числа оборотов) вращающегося тела — 293

ТВД — турбовинтовой двигатель — 310
Телемеханика — область техники, разрабатывающая способы управления различными механизмами на расстоянии — 489
Тембр — особая «окраска» звука, образующаяся вследствие сочетания основного тона и сопутствующих ему тонов более высокой частоты — 263
Температура — основной признак теплового состояния тела, степень его нагретости — 392, 494
Термистор — полупроводниковый прибор, измеряющий силу протекающего через него тока в строгом соответствии с изменениями температуры— 494
Термодинамика — наука, изучающая условия перехода тепла в работу — 394
Термоэлектронная эмиссия — излучение электронов нагретыми телами — 418, 458
Томсон, Джозеф Джон (1856—1940) — предложил модель атома (1903) — равномерно заполненную положительным зарядом сферу, внутри которой находятся электроны — 512, 516
Тон — звук, порождаемый телом, колебания которого происходят по гармоническому закону с неизменной частотой — 264
Торричелли, Эванджелиста (1608—1647) — итальянский математик и физик. Известен исследованиями упругости воздуха и созданием барометра — 259, 374
Транзистор — полупроводниковый прибор, часто именуемый кристаллическим триодом. Способен усиливать радиосигналы и, следовательно, заменить радиолампу — 498
ТРД — турбореактивный двигатель — 309, 318
Трек — след, оставляемый движущейся частицей на фотопластинке, в газе или жидкости — 527
Триггер — специальная схема с электронными лампами — 489
Триод — трехэлектродная электронная лампа — 460, 497
Тритий — радиоактивный изотоп водорода, у которого ядро атома состоит из протона и двух нейтронов— 542
Туполев, Андрей Николаевич (р. 1888) — советский авиаконструктор, академик — 308
Турбулентное течение — течение жидкости (или газа), при котором элементы жидкости (газа) совершают неупорядоченные, неустановившиеся движения по сложным траекториям, что приводит к усиленному перемешиванию движущейся жидкости (газа)— 298
Тяжелая вода — разновидность воды, в которой обычный водород заменен дейтерием или тритием— 537

Ультразвук — упругие волны с частотой выше 15 000—20 000 *гц*. Наиболее высокие частоты ультразвуков наблюдались до 10^9 *гц* — 271
Ультрафиолетовое излучение — невидимое излучение с длиной волны до 4000 до 150 ангстрем — 452, 470
Умов, Николай Алексеевич (1846—1915) — русский физик и математик. Известен исследованиями энергии упругих волн — 262

Фаза — отдельная стадия в развитии какого-либо процесса — 437, 447
Фалес Милетский (624—548 до н. э.) — древнегреческий философ и ученый — 355, 407
Фарадей, Майкл (1791—1867) — крупнейший английский физик. Сделал ряд важных открытий, в том числе первым обнаружил электромагнитную индукцию — 238, 407, 425, 451
Ферми, Энрико (1901—1954) — итальянский физик, основоположник теории элементарных частиц, один из создателей первого атомного реактора— 525, 532
Ферриты — вещества, приобретающие в результате специальной обработки ценные магнитные свойства и являющиеся ферро-магнитными полупроводниками — 499
Ферромагнетизм — магнитные свойства веществ, относящихся к группе сильномагнитных тел— 422
Физо, Ипполит (1819—1896) — французский физик. Известен измерением скорости света — 438
Фильтр — вещество или установка для очистки жидкостей путем процеживания; светофильтр — прибор, поглощающий волны определенной длины — 454
Флеров, Георгий Николаевич (р. 1913) —советский физик, чл.-корр. АН СССР. Совместно с К. А. Петржаком обнаружил спонтанное деление ядер урана — 534
Флуоресценция — один из видов люминесценции — 456
Фокус — точка на оптической оси системы отражающих или преломляющих кривых поверхностей, в которой пересекаются лучи после отражения или преломления у этих поверхностей — 479
Форсажная камера — камера дожигания горючего в некоторых видах реактивных двигателей — 311
Форсунка — приспособление для распыления топлива, обеспечивающее его более полное сгорание — 321
Фосфоресценция — свечение люминофора, продолжающееся после прекращения возбуждения — 456, 508
Фотоионизация — ионизация молекул и атомов под действием света — 455
Фотометр — прибор для измерения силы света — 432
Фотон — частица излучения, энергия которой равна одному кванту — 257, 337, 502
Фотоэлемент — прибор, преобразующий энергию излучения в электрическую — 268, 455, 502
Френель, Огюстен (1788—1827) — основоположник волновой механической теории света. Известен теоретическими и экспериментальными исследованиями многих оптических явлений — 436
Фуко, Леон (1819—1868) — французский физик, известный измерением скорости света, исследованиями магнитных и электрических явлений (токи Фуко), а также доказательством вращения Земли (маятник Фуко) — 438, 439

Ц

Центр тяжести тела — точка приложения равнодействующей сил тяжести — 251

Цикл — процесс, в конце которого тело возвращается в первоначальное состояние — 541

Циолковский, Константин Эдуардович (1857—1935) — выдающийся русский ученый и изобретатель. Сделал ряд важных открытий в теории межпланетных сообщений и ракетной технике — 251, 293, 320

Ч

Чаплыгин, Сергей Алексеевич (1869—1942) — советский ученый, академик, Герой Социалистического Труда, один из основоположников газодинамики — 308

Чедвик, Джемс (р. 1891) — английский физик. Открыл нейтрон. Возглавлял группу английских ученых, участвовавших в создании атомной бомбы в США — 522

Черенков, Павел Алексеевич (р. 1904) — советский физик, лауреат Нобелевской премии. Открыл излучение заряженных частиц в среде при их движении со скоростью, бо́льшей скорости света в данной среде — 529

Э

Эдисон, Томас (1847—1931) — американский изобретатель. Известен своими исследованиями в области записи звука. Сделал ряд открытий, имеющих техническую ценность (например, усовершенствование нити накала электрической лампочки) — 266, 457, 459

Эйнштейн, Альберт (1879—1955) — крупнейший немецкий физик, основоположник теории относительности — 257, 455, 531, 540

Экспонометр — прибор для определения экспозиции при фото- и киносъемке. Экспозиция — доза облучения при фотографировании — 502

Эластичность — свойство материала испытывать значительные упругие деформации без разрушения — 371

Электрон — элементарная частица, несущая минимальный отрицательный электрический заряд $4{,}8.10^{-10}$ CGSE и имеющая массу $9{,}1.10^{-23}$ г — 405, 491

Электронография — метод исследования строения вещества, основанный на дифракции электронов — 479

Эмиттер — один из электродов транзистора — 498

Эрстед, Ханс Кристиан (1777—1851) — датский физик. Открыл влияние тока на магнитную стрелку. Его именем названа единица напряженности магнитного поля — 420

Эхолот — прибор для автоматического измерения глубины путем улавливания отраженных от дна ультразвуковых волн — 274

Ю

Юнг, Томас (1773—1829) — английский естествоиспытатель. Известен своими исследованиями в оптике. Объяснил, в частности, явление интерференции света — 447

ХИМИЯ И ЕЕ РОЛЬ В ЖИЗНИ ЛЮДЕЙ

«Широко распростирает химия руки свои в дела человеческие», — сказал двести лет назад один из основоположников современной научной химии гениальный русский ученый М. В. Ломоносов, произнося «Слово о пользе химии» в публичном собрании Академии наук.

Сегодня справедливость этих слов ясна и понятна любому человеку в мире. Современная техника, в том числе авиация и атомная промышленность, использует полученные химиками новые типы материалов, легких, прочных, обладающих необычными свойствами, устойчивых к разнообразным воздействиям.

Различные отрасли народного хозяйства потребляют сотни тысяч тонн продукции химической промышленности (кислот, солей, щелочей, синтетического каучука, пластических масс, искусственных и синтетических волокон, синтетических спиртов, моющих средств, органических веществ — полупродуктов для получения разнообразных материалов, лаков, красителей). Транспорт в результате применения химических методов в нефтяной промышленности получает высококачественное топливо и смазочные масла́.

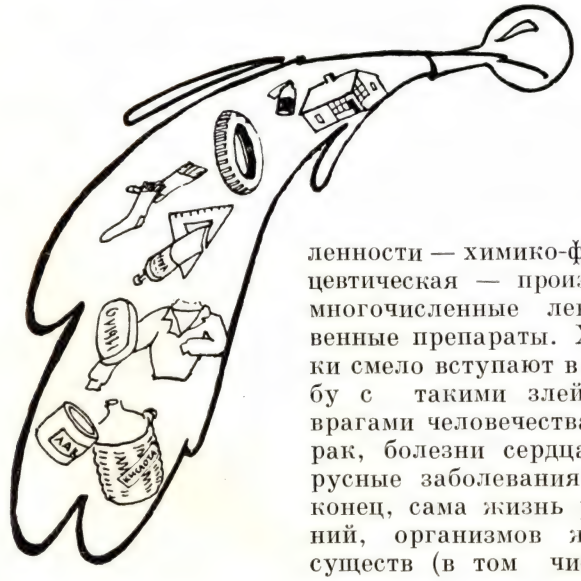
Сельское хозяйство использует в огромных количествах минеральные удобрения, вещества для борьбы с вредителями сельскохозяйственных растений (инсектициды), для уничтожения сорняков (гербициды), а также для регулирования роста растений (ростовые вещества).

Благодаря достижениям химии необычайно изменился быт человека. Все более и более

широкое распространение получает одежда из искусственных и синтетических волокон, красивая и прочная.

Применение химии в пищевой промышленности позволяет улучшать свойства пищевых продуктов, придавать им новые вкусовые качества, длительное время сохранять в свежем виде.

Велика роль химии в борьбе с болезнями человека, в борьбе за его здоровье и долголетие. Специальная отрасль химической промышленности — химико-фармацевтическая — производит многочисленные лекарственные препараты. Химики смело вступают в борьбу с такими злейшими врагами человечества, как рак, болезни сердца, вирусные заболевания. Наконец, сама жизнь растений, организмов живых существ (в том числе и человеческого организма) представляет собой сложнейшую совокупность многочисленных и разнообразных химических процессов.



В мае 1958 г. состоялся Пленум Центрального Комитета Коммунистической партии Советского Союза, который принял постановление об ускорении развития химической промышленности и особенно производства синтетических материалов и изделий из них для удовлетворения потребностей населения и нужд народного хозяйства. Это постановление означает начало нового расцвета химической науки и промышленности в нашей стране. Решающую роль в его выполнении предстоит сыграть советской молодежи — сегодняшним пионерам и комсомольцам. Почетно быть химиком, и молодежь станет в ряды армии, штурмующей высоты химической науки, создающей новые промышленные химические процессы, строящей заводы, работающей на них.

Что же такое химия? Что такое химическая реакция, лежащая в основе получения нужных человеку веществ и продуктов?

Д. И. Менделеев, творец знаменитой периодической системы элементов, так ответил на вопрос о том, что такое химия, в своем труде «Основы химии»: «Ближайший предмет химии составляет изучение однородных веществ, из сложения которых составлены все тела мира, превращений их друг в друга и явлений, сопровождающих такие превращения».

Следовательно, химия изучает не только вещества сами по себе, но и процесс химического превращения, т. е. механизм изменений, происходящих с веществами при химических реакциях, в результате которых исходные вещества превращаются в нужные человеку продукты. При этом химик наблюдает самые разнообразные явления — изменение окраски растворов, образование осадков, выделение газов, свечение, горение, взрывы и т. д. Химик должен знать, почему возникают эти явления, должен уметь их использовать в тех случаях, когда они полезны, и подавлять, когда они вредны.

Химик-ученый, инженер, лаборант, познают механизм химических превращений, широко используя методы современной физики, построенные на математическом анализе изучаемых явлений. Следовательно, они должны хорошо знать не только химию, но также физику и математику. Физика дает возможность понять природу химических сил, удерживающих в мо-

лекулах атомы и заставляющих их образовывать новые молекулы в ходе химических превращений.

Физические методы исследования позволяют химику не только изучить конечные продукты реакции, но и «заглянуть внутрь» химической реакции, «увидеть» поведение молекул исходных веществ и образование промежуточных продуктов. Современные физические методы позволяют зарегистрировать в сложных химических реакциях образование так называемых «свободных радикалов» — весьма мало устойчивых частиц, живущих менее одной десяти- и стомиллионной доли секунды. Свободные радикалы — это осколки молекул. Они обладают большой химической активностью. В ряде случаев добавление свободных радикалов в сосуд, в котором идет химическая реакция, значительно ускоряет процесс, позволяет получить продукт с новыми полезными свойствами.

Свободные радикалы представляют собой промежуточные продукты («активные центры») в цепных химических реакциях. Цепные реакции — это замечательный механизм многих химических реакций. Цепные реакции очень чувствительны к различным воздействиям.

Если химик будет производить такие воздействия, которые приводят к образованию свободных радикалов, то цепей будет зарождаться все больше и больше и реакция пойдет быстрее. Свободные радикалы можно создавать, воздействуя на вещества нагреванием, светом, радиоактивными излучениями, электрическим разрядом и т. п.

Цепные реакции идут, например, при полимеризации, позволяющей получать многие высокомолекулярные синтетические материалы; при крекинге, дающем высококачественные бензины; при хлорировании органических веществ, позволяющем получать ядохимикаты, средства пожаротушения, растворители и т. п.

В тех случаях, когда в цепных процессах при реакциях одного свободного радикала образуется больше чем один новый радикал (например, три), реакция самоускоряется и может привести к воспламенению. Это — так называемые цепные разветвленные процессы. Во многих случаях самоускорение развивается медленно. Так обстоит дело при окислении органических веществ (например, углеводородов из нефти). В результате получаются продукты окисления (сырье для синтеза высокополимеров и др.).

Свободные радикалы легко захватываются различными посторонними молекулами, поэтому цепную реакцию нетрудно «оборвать». В некоторых случаях это полезно, так как многие цепные реакции нежелательны (например, окислительная порча пищевых жиров, «старение» крекинг-бензинов и смазочных масел и др.).

В настоящее время ученые уже умеют накапливать и сохранять свободные радикалы в «замороженном» состоянии путем применения сверхнизкой температуры. Они изучают их свойства и изыскивают новые пути технического использования.

Во всех этих исследованиях химики сотрудничают с физиками, а в тех случаях, когда требуются серьезные математические расчеты,— то и с математиками. Сейчас для изучения многих сложных химических процессов применяется самая современная вычислительная техника— электронные счетные машины.

Интересно отметить, что химики открыли цепные реакции в химических процессах на два-три десятилетия раньше, чем физики открыли цепной процесс деления атомных ядер урана и плутония. Открытие физиков положило начало веку атомной энергии.

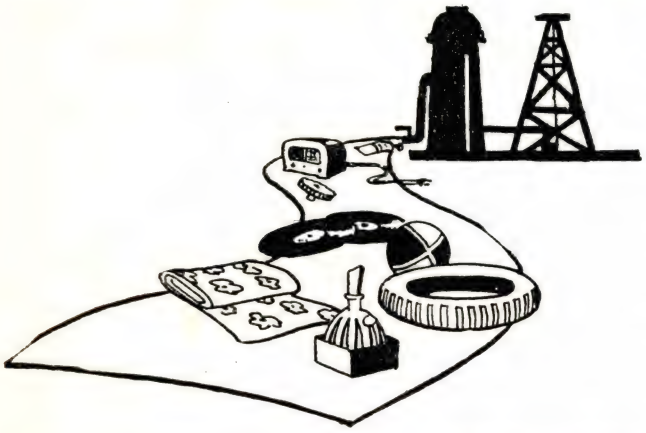
Химики же имеют сейчас все возможности для того, чтобы всемерно использовать свойства цепных реакций в химии и создать на этой основе такие химические производства, которые позволили бы говорить о веке цепных химических реакций.

Все большее значение приобретает физическая химия — область науки, в которой совместно работают химики и физики. Именно физико-химики изучают такое замечательное явление, как катализ— ускорение химических реакций. Они работают над получением твердых материалов с заранее заданными свойствами, основываясь при этом на знании тех физико-химических явлений, которые происходят в твердых телах при их использовании на практике.

Физико-химики исследуют химические реак-

ции, происходящие под действием электрического тока, и, наоборот, явления образования тока в результате химических реакций (процесс, происходящий в аккумуляторах).

Химики-органики активно работают над получением так называемых элементоорганических соединений. Это органические соединения, в молекулы которых, кроме атомов углерода, водорода и кислорода, включены также другие элементы — фосфор, фтор, кремний, титан, алюминий и др. Элементоорганические соединения широко используются для получения новых типов пластмасс, каучуков, лекарственных препаратов, ядохимикатов и т. п.



Химики-органики разрабатывают новые методы получения исходных веществ («мономеров») для синтеза высокомолекулярных веществ (синтетических волокон, пластмасс, каучуков и т. п.).

Химики, работающие в области нефтехимической промышленности, разрабатывают процессы получения многочисленных ценных химических продуктов путем химической переработки нефти.

Большое внимание уделяется в настоящее время биологической химии и изучению так называемых биологически активных веществ. Биохимики изучают витамины — важную составную часть продуктов питания; ферменты — биологические катализаторы, которые управляют всеми происходящими в организме биохимическими процессами; антибиотики (пенициллин, стрептомицин и др.), имеющие огромное значение для лечения многочисленных заболеваний (туберкулез, тифы, дизентерия и т. п.); гормоны — вещества, вырабатываемые в организме и активизирующие многие важные биохимические процессы; белки — главную составную часть живого тела и многие другие органические соединения.

В самое последнее время биохимики открыли явления, показывающие, что в организме животных и растений протекают различные химические процессы, при которых также образуются свободные радикалы. В ряде случаев это позволяет понять характер развития многих болезней и дает возможность изыскивать способы борьбы с ними путем различных химических (лекарственных) воздействий.

Химики-неорганики работают над получением и использованием на практике многих элементов, которые до самого недавнего времени почти не находили себе применения. Так, германий применяется в технике полупроводников, цирконий и бериллий используются в атомных реакторах. Многие редкие элементы находят применение при создании жаропрочных и других специальных сплавов и т. п.

Мы перечислили только некоторые из основных проблем, над которыми работают современные химики. В действительности роль химии в жизни человека неизмеримо больше и в той или иной форме охватывает почти все области его практической деятельности. Согласно решениям XXI съезда КПСС, объем продукции химической промышленности вырастет в нашей стране в течение ближайшего семилетия в три раза. Это потребует подготовки многих десятков тысяч инженеров-химиков и квалифицированных рабочих химической промышленности.

Поэтому нет никакого сомнения в том, что многие читатели этой книги изберут себе профессию химика и пойдут трудиться на одно из предприятий химической промышленности.

В последующих статьях наши юные читатели найдут много сведений из области химии, которые окажутся очень полезны не только тем, кто захочет посвятить свою жизнь этой увлекательной науке, но и тем, кто мечтает стать металлургом, агрономом, врачом, ибо влияние современной химии и проникновение ее в другие науки огромно.

История химии

КАК ВОЗНИКЛА ХИМИЯ

Начало химии теряется в тумане глубокой древности; неясно и происхождение самого слова «химия». По-видимому, оно произошло от слова «Хэми» — древнего названия Египта. Слово «химия» впервые появилось в конце III в. н. э. в сочинениях александрийских ученых, где под «хэмией» понимали искусство «черной страны Хэми» — Египта.

Египет был технически передовой страной древнего мира. В Египте за тысячелетия до нашей эры добывали золото, медь, серебро, железо, свинец и олово.

Все эти металлы, кроме самородного золота, приходилось получать из руд. Добывая металлы, не беспокоились об истощении их запасов. Древние металлурги были уверены, что на месте извлекаемых металлов при доступе внутрь земли воздуха все время «вырастают» новые металлы, родятся новые руды... Приблизительно за 300 лет до н. э. научились превращать «красный минерал» (киноварь—HgS) в загадочную серебристо-белую металлическую жидкость (ртуть). Тяжелая, холодная, «юркая», она вызывала великое изумление, а потом, через тысячелетие, приобрела исключительно важное значение в работе алхимиков.

Еще за тысячу лет до нашей эры египтяне научились «варить» стекло. Для варки применяли соду и поташ; соду добывали из природных содовых озер, которые встречаются в Египте, а поташ получали из древесной золы или из золы морских водорослей. Обе соли шли на изготовление мыла.

Интересно, что мыло в те времена применяли как крем, который знатные египтянки накладывали на лицо.

В Древнем Египте широко были развиты химические ремесла. Египтяне умели дубить кожу, извлекать из растений лекарственные и душистые вещества, изготовлять керамические изделия, добывать разнообразные краски.

Из всех получаемых египетскими мастерами веществ самыми ценными было золото и пурпур. Золото открывало все двери, делало человека могущественным. Желание обладать золотом породило заманчивую идею получать его из обыкновенных дешевых металлов — меди, свинца, железа.

Возможность такого получения подтверждалась жизненными наблюдениями. Не раз видели, как железный нож, упавший в сине-зеленую воду медных рудников, превращался в «медный». Появление слоя красной меди, вытесненной железом из медного купороса рудничной воды, всерьез принимали за превращение железа в медь. Но если железо превращается в медь, то, очевидно, и медь можно превратить в золото. Случайные наблюдения показали, что для такого превращения нужно в расплавленную медь бросить кусок камня «галмея» (цинковая руда).

Получаемое таким способом «искусственное золото» (латунь — сплав меди с цинком) неотличимо от настоящего — имеет тот же цвет, тот же изумительный блеск...

Один только недостаток у «искусственного золота»: оно с течением времени «заболевает» — покрывается зеленой «сыпью» и «язвами». Болезни, по верованию египтян, приносят человеку (и металлам) злые духи. Их «отгоняли» специальными заклинаниями — молитвами. Эти заклинания «для профилактики» стали произносить и при изготовлении «искусственного золота»... Вот почему к разным химическим работам египтян стала примешиваться мистика.

Искусство получения золота и других ценных веществ издавна называлось «священным искусством» и находилось в руках жрецов. При египетских храмах были лаборатории. Вход в них был закрыт для всех, кроме жрецов и сыновей фараонов. В лабораториях, по-видимому, работали «засекреченные» мастера-специалисты, передававшие свой опыт из поколения в поколение...

Египет богател. Все более и более укреплялось мнение, что своим богатством он обязан «священному искусству».

Под влиянием астрологов в «священное искусство» проникло мистическое верование в связь между небесными светилами и металлами. Астрологи утверждали, что каждой планете на небе соответствует определенный металл на Земле: Солнцу,— конечно, золото, бледной Луне — серебро, Венере — медь, Меркурию — ртуть, Юпитеру — олово, медленно движущемуся Сатурну — тяжелый свинец, красноватому Марсу — гремящее в боях железо. Каждая планета издревле обозначалась особым значком. Этими же значками стали обозначать и «родственные» планетам металлы. (Названия «меркурий» для ртути и «сатурн» для свинца сохранялись вплоть до конца XIX в.)

Изготовление искусственного золота в III в. н. э. приобрело такой размах, что император Диоклетиан издал указ о сожжении всех египетских рукописей, в которых даются рецепты получения золота. Указ был выполнен. Но, к счастью для историков химии, несколько рукописей (папирусов) уцелело. Они были найдены в начале XIX в. при археологических раскопках одной гробницы в Фивах. В папирусах имеются интересные рисунки перегонных аппаратов, колб, печей и пр., даны описания обработки металлов и рецепты грубых подделок «золотых» сплавов, имитаций драгоценных камней и т. д.

КАК ХИМИЯ ПРЕВРАТИЛАСЬ В АЛХИМИЮ

В VII в. Египет был захвачен арабами. Огню и мечу были преданы многие культурные ценности. Но наводнившие

Египет завоеватели заинтересовались химией. К слову «химия» они прибавили арабскую приставку «ал» — появилось слово «алхимия». Под таким названием в дальнейшем стали понимать науку или искусство превращения металлов в золото.

Покорив в VIII в. почти всю Испанию, арабы создали там свое государство, получившее в дальнейшем название «Кордовский халифат». Столица халифата Кордова, шумный город с полумиллионным населением, с 27 высшими учебными заведениями (арабские академии), с огромными библиотеками, славилась как крупнейший научный центр в Европе. Тысячи юношей из всех европейских стран тянулись в кордовские академии для изучения астрономии, геометрии, алгебры, медицины, алхимии и других наук.

Напитавшись средневековой наукой, молодежь возвращалась на родину, где своими восторженными рассказами об алхимическом получении золота способствовала распространению алхимии. Так алхимия, зародившись в Египте, через арабов перекочевала в Кордову, а оттуда — в западноевропейские государства.

Вздорные слухи о невероятных обогащениях алхимиков при помощи алхимических «трансмутаций» (превращений) разжигали интерес к таинственной науке, и алхимия начала шествовать по Европе, где достигла своего расцвета в XIII в.

Первым виднейшим алхимиком был арабский ученый Джабир ибн-Хайян (VIII в.). Он известен в Европе под именем Гебера. В отличие от всех туманных средневековых алхимических трактатов сочинения Джабира написаны ясно, причем основное место в них занимает описание химических операций — возгонки, перегонки, кристаллизации и т. д. Джабир прославился созданием «химической теории» строения металлов. На этой «теории» основывается вся тысячелетняя «творческая» работа алхимиков.

По теории Джабира, металлы рассматриваются как вещества, состоящие из соединения двух «начал» («принципов», или «элементов»): серы (сульфура) и ртути (меркурия).

Удивительная ртуть, растворяющая все металлы и вновь выделяющая их при нагревании амальгам, является матерью всех металлов («металлы родятся из ртути»). Сера — сульфур — отец металлов. Вот что пишет о ртути некий алхимик в книге «Из записок алхимика»:

«Семь металлов создал свет
По числу семи планет;
Дал нам космос на добро
Медь, железо, серебро,
Злато, олово, свинец.
И спеши, мой сын, узнать—
Всем им ртуть родная мать!»

В этом поэтическом произведении интересны первые две строчки. Они свидетельствуют о том, что идея связи металлов с планетами процветала и в средние века.

Ртуть считалась носителем металлических свойств металлов, а сера обусловливала изменяемость металлов от огня. Ртути приписывали совершенно сверхъестественные свойства. Так, некоторые алхимики утверждали, что после растворения золота в ртути его количество возрастает, ртуть, как говорили, «размножает» золото.

Сколько времени, средств, а главное, здоровья было убито на опыты «размножения» золота, пока не убедились, что золото, увы, не размножается, а, наоборот, получается в процессе опыта в несколько меньшем (вследствие неизбежных потерь) количестве!

По алхимической «теории» для превращения свинца, железа и любого другого металла в золото, кроме веры и страстного желания, нужно было иметь какие-то чудодейственные «медикаменты», которые разделяли по степени их силы и даже по «добродетели» на порядки: медикаменты первого порядка вызывают небольшие изменения в металле. Медикаменты второго порядка уже сообщают неблагородным металлам некоторые свойства благородных, и лишь медикамент третьего порядка — «камень философов», он же «великий элексир», или «магистериум»,— «брошенный на металл или на несовершенное вещество, делает их совершенными (превращает в золото) в момент прикосновения» (Бэкон, «Изображение алхимии»).

О силе «философского камня» мнения ученых расходились. Так, Роджер Бэкон утверждал, что унция «великого элексира» способна превратить в чистое золото миллион унций свинца или железа.

Алхимик Вилановиус несколько скромнее: по его расчетам, унция «великого элексира» превращает в золото всего 100 унций другого металла.

«Философский камень» является универсальным «медикаментом», одно лишь прикосновение его к хилому, беззубому, лысому, беспомощному старику в мгновение ока превращает его в дышащего здоровьем красавца-юношу.

Уверяли, что «адепты», т. е. счастливые обладатели «философского камня», могут продлить свою жизнь до 400 лет и больше, и в подтверждение этого приводили долгую жизнь апокрифических патриархов, которые якобы употребляли «жизненный элексир» в каплях.

Как же алхимики практически в лабораториях пытались получать «философский камень»? Из какого сырья? Путем каких химических операций?

Казалось бы, ответы на эти вопросы можно получить в многочисленных алхимических трактатах. Но они написаны таким непонятным, туманным языком, что, читая их, чрезвычайно трудно добраться до смысла.

«Тайны слишком драгоценны, чтобы их открывать простому народу», или, как говорили, «профанам». «Философы поклялись никогда этого не открывать» и т. д., «ибо бог хочет, чтобы это осталось скрытым...»

Кроме таких «веских» причин, была еще одна, может быть, более важная — спасение чести «алхимического мундира». Ведь напиши алхимики свой «рецепт» получения «философского камня» простыми, понятными словами, каждый, кто в точности по рецепту будет готовить камень и его не получит, всю вину возложит на автора...

Отсюда и весь тот мистический туман, который окутывает трактат, и непонятные слова и выражения, под которыми можно понимать все что угодно. Алхимические трактаты пестрят такими неведомыми названиями препаратов, как «зеленый лев», «хвост и кровь дракона», «пятнистая пантера», «красный жених и лилейная невеста», «ихневмон», «василиск» и т. д.

Вот пример одного рецепта, автор которого любезно идет навстречу читателю, разбивая все химические операции по пунктам:

1) мы соединяем, т. е. делаем А из крови дракона и меркурия (ртути); 2) мы подвергаем гноению и перевариванию при двойном жаре сказанное; 3) после того как оно сгноено и переварено, мы его разрешаем; 4) после разрешения отделяем и разделяем; 5) после отделения и разделения мы его очищаем и чистим.

Вот и все — «философский камень» получен!

Читать труды алхимиков — это подвиг. Нарочито непонятно написанные, они пестрят еще и алхимическими знаками, одни из которых должны обозначать вещества, другие — аппаратуру, третьи — химические операции. Знаменитый узник Шлиссельбургской крепости, революционер, ученый Н. А. Морозов с большим трудом расшифровал эти загадочные знаки и свел их в таблицы.

Встречая в книге непонятные значки, читатель невольно проникался уважением и к учености автора, и к самóй таинственной науке. Поэтому алхимики очень любили значки и гордились «непревзойденно умной книгой», составленной только из алхимических знаков («немая книга»).

О природе и физических свойствах «философского камня» мнения алхимиков расходились:

«Он и минерал, и растение, и животное»,— пишет один. «Он все разрушает, растворяет, замораживает и раскаляет»,— говорит другой. «Он влажен, способствует пищеварению», — утверждает третий и т. д. Интересно, что о камне пишут так, как будто его получали, держали в руках и проделывали разные химические опыты.

Что же представляли собой средневековые алхимики? Вначале это были честные, увлекающиеся, слепо верящие в алхимические бредни ученые, всю жизнь искавшие «философский камень».

Эти несчастные труженики не бросали своих работ, несмотря на постоянные неудачи, невзирая на страшные отравления парами ртути, окислами азота, сернистым газом и др.

На средневековых гравюрах многие алхимики изображены в монашеских одеяниях с четками в руках. Алхимия находилась под особым покровительством церкви. В католических монастырях были лаборатории, в которых работали монахи-алхимики.

Церковь поддерживала алхимию прежде всего потому, что через своих ученых-монахов надеялась обогатиться. Кроме этой чисто экономической причины, была и другая, не менее важная: алхимия полна мистики, работа алхимика основана на вере в сверхъестественное, чудесное — как же не поддержать такую науку?!

Чтобы иметь представление о жизни и работе ученых-алхимиков, познакомимся с биографиями двух прославленных ученых.

Вот из тьмы страшного средневековья встает трагическая фигура большого ученого XIII в. англичанина Ро́джера Бэ́кона. Он окончил Оксфордский университет. С кафедры смело проповедовал, что основой истинной науки является наблюдение и опыт, а не слепая вера в авторитет и традиции. И приходится удивляться, как эти прогрессивные взгляды ученого могли уживаться рядом с его увлечением алхимией.

Какая-то неудачно сказанная и неправильно понятая слушателем фраза породила слухи о том, что «философский камень» Бэконом уже получен! Бэконом заинтересовались «святые отцы» католической церкви; под их давлением ученый становится монахом и начинает работать в монастырской лаборатории. Для ускорения работы сам папа устраивает Бэкона в лабораторию Парижского университета. Там Бэкон работает под тайным наблюдением монахов-сыщиков. Неутомимая работа ученого вызывает восхищение. Бэкона называют «doctor mirabilis»— «удивительный доктор». Вместе с ростом славы Бэкона растет уверенность папы в том, что алхимический секрет Бэконом открыт и камень получен, но ученый не желает делиться секретом.

Бэкона без конца допрашивают, требуют открытия тайны, но ученый молчит. Что он может сказать, если все его труды не дали никаких результатов...

И вот Бэкона бросают в тюрьму, в одиночное заключение, лишают права переписки, разговора, общения с кем бы то ни было. Спустя много лет папа приказывает узнику честно написать все, что тот знает о способах получения золота.

Бэкон пишет три большие монографии. Папа и кардиналы изучают представленные работы, конечно, ничего не понимают и приходят к печальному выводу: тайна получения «философского камня» Бэкону неизвестна.

После двадцатилетнего одиночного заключения двери тюрьмы открываются; Бэкон на свободе. Он решает покинуть Францию и бежит в Оксфорд, где снова принимается за поиски «философского камня». Но Бэкона снова сажают в тюрьму, снова требуют выдачи секрета; проходят еще четыре года одиночного заключения, и Бэкон — дряхлый 80-летний старик — умирает...

А вот яркое светило на алхимическом горизонте — Альберт Большетедтский, известный под именем Альберта Великого. Врач, философ, математик, физик, алхимик и «ритор», Альберт был ходячей энциклопедией всех знаний XIII в. Его эрудиция приводила современников в ужас и была причиной того, что ученого заподозрили в колдовстве.

Биографы совершенно серьезно рассказывали, как Альберт изготовил живую человеческую голову, с которой по ночам консультировался по разным вопросам. Альберт не попал в тюрьму только потому, что занимал кафедру богословия, был епископом.

Последние 15 лет жизни Альберт усиленно работал в монастырской лаборатории и сделал немало важных открытий.

Он первый выделил и описал мышьяк, природа которого была установлена только через четыре столетия. Бесконечные экспериментирования с серой и ртутью привели ученого к открытию сульфидов (сернистых металлов).

Парацельс — Филипп Ауреол Теофраст Бомбаст фон Гогенгейм (1493—1541).

Сульфиды, несмотря на их различный цвет, твердость и другие физические свойства, Альберт Великий объединил в одну группу под названием марказитов. Относя то или иное вещество к марказитам, ученый делал «пробу на пламя». При прокаливании марказитов всегда появляется характерный резкий запах горящей серы ($2PbS + 3O_2 = 2PbO + 2SO_2$). Интересно, что многие марказиты Альберт получал синтетически, соединяя свинец, железо и другие металлы с серой.

Наряду с настоящими алхимиками-учеными в средние века было великое множество шарлатанов, спекулировавших на интересе к алхимии. По заказу различных владетельных особ они изготовляли алхимическое золото, из которого чеканили монеты. Заказчик был в восторге, алхимик хорошо вознаграждался и бежал, пока не обнаруживалась подделка. Если бежать не удавалось, судьба алхимика складывалась печально: тюрьма или виселица.

Наводнением рынка поддельным золотом «прославились» английский король Генрих VI, французский король Карл II и другие.

А вот любопытная алхимическая история XVII в.

В 1648 г. некто фон Рутц из Праги на глазах императора Фердинанда III и его свиты, накаливая какой-то алхимический порошок, превратил его в чистое золото. Восторг зрителей не поддавался описанию! Рутца щедро наградили, а из полученного им золота была выбита медаль с надписью «Божественное превращение, произведено в Праге 15/I 1648 г. в присутствии Его Имп. Вел. Фердинанда III». Эта замечательная «алхимическая» медаль до настоящего времени хранится в одном из западноевропейских музеев.

Что же за чудесный порошок был в руках ловкого шарлатана? Это могло быть просто чистое золото, выделенное из раствора его соли; оно не блестит и похоже на глину. Или это мог быть коричневый порошок хлорного золота ($AuCl_3$), которое при прокаливании разлагается на золото и хлор.

АЛХИМИЯ ПРЕВРАЩАЕТСЯ В ЯТРОХИМИЮ

В то время, как сотни алхимиков бились над получением «философского камня», некоторые из них интересовались и практической химией. Представителем алхимии этого направления считается легендарный Базилиус Валентинус, католический монах, живший в XV в.

Он прежде всего «развил» теорию металлов (Джабира), дополнив ее третьим элементом— солью (принцип твердости). В соответствии с христианской догмой о «троице» (бог-отец, бог-сын, бог — дух святой) каждый металл содержит три начала — соль, серу и ртуть.

Труды Базилиуса написаны очень туманно и снабжены наивными рисунками «химических реакций».

Базилиус открыл новый металл — сурьму. Так как сурьма являлась восьмым по счету металлом, которому не хватало планеты на небе, ученые не хотели признавать ее металлом. Очевидно, поэтому Базилиус называл сурьму «видоизменением свинца». Видоизменение — не металл и не нуждается в подруге— планете!

Сурьма нашла широкое применение в медицине. Базилиус начал с увлечением лечить сурьмой и ее солями самые разнообразные болезни, не обращая внимания на ядовитость сурьмяных препаратов. Он изготовлял даже «вечные сурьмяные пилюли», которые, проходя через организм больного, оказывали свое действие,

а выйдя наружу, вновь применялись для лечения. Базилиус Валентинус предложил способ получения «соляного спирта» (HCl), железного купороса, всевозможных солей сурьмы и пр.

Применение в медицине сурьмы и ее солей создало новое — «ятрохимическое» направление в химии. По учению «отца ятрохимии» прославленного врача Парацельса (1493—1541), человеческое тело состоит из соединения алхимических элементов — серы, соли и ртути, которые в здоровом организме находятся в гармоническом сочетании. При нарушении гармонии элементов возникают болезни, например, избыток серы вызывает лихорадку и «моровую язву», избыток ртути — меланхолию, соли — расстройство желудка и т. д.

Лечить болезни надо введением в организм недостающих элементов в виде сернистых, ртутных препаратов и соли. Лечение неорганическими препаратами вместо применявшихся лекарств органического происхождения (настои трав, экстракты и т. п.) вызвало целый переворот в медицине. Представители ятрохимии в одном лице совмещали врача и химика-фармацевта. Ятрохимик искал и изготовлял лечебные неорганические препараты и сам испытывал их действие на больных.

Новое направление оттеснило на задний план алхимические проблемы и способствовало дальнейшему развитию химии. Ятрохимики открыли много солей, впервые описали реакцию нейтрализации, разрабатывали приемы качественного анализа, пробуя лекарства «на язык», предложили первую наивную классификацию веществ на «мыльные и кислые».

В ятрохимический период впервые было обращено внимание на существование «воздухоподобных веществ, отличных по своим свойствам от воздуха». Прославленный ятрохимик Ван-Гельмонт (1577—1644) назвал их газами (от слова «хаос» — бесформенная материя). В трактатах ученого упоминаются «лесной газ» (CO_2), ядовитый «угольный» (смесь CO и CO_2), «горящие» (CH_4 и H_2). Различая газы, Ван-Гельмонт не изучил подробно ни одного из них — этому мешала уверенность в том, что газы «нельзя заключать в сосуды». Ван-Гельмонта называют «отцом пневматохимии» (химии газов), к которой ученые обратились лишь через столетие.

В то время, как ятрохимики готовили лекарства, а алхимики продолжали свои бесплодные поиски «философского камня», трудились еще и химики-производственники. Среди них в XVI в. выделялся знаменитый Агрикола (1494—1555), врач по образованию, посвятивший всю свою жизнь изучению металлургии и минералогии.

Агрикола прославился своим замечательным руководством по металлургии и разработкой анализа руд и заводских продуктов. Книга Агриколы написана так полно и просто, что целых два столетия являлась настольной книгой металлургов. Она была известна Петру I, по ней занимался Ломоносов.

Другой выдающийся химик-производственник — Иоганн Глаубер (1604—1668). Он не был чужд алхимических суеверий, но они ему, как и Агриколе, не мешали заниматься прикладной химией.

Глаубер разработал способ получения соляной кислоты действием купоросного масла (H_2SO_4) на каменную соль и предложил использовать отход производства — «мирабилит», названный впоследствии глауберовой солью ($Na_2SO_4 \cdot 10H_2O$).

Глаубер дал способ получения дымящей азотной кислоты, солей аммония и многих других веществ.

ХИМИЯ СТАНОВИТСЯ НАУКОЙ

Первый сокрушительный удар алхимии был нанесен выдающимся английским физиком и химиком Робертом Бойлем (1626—1691). Опираясь на опыт, накопленный алхимиками, он разоблачил их мистические элементы и предложил считать за элементы «простые вещества, которые, не будучи составленными из других веществ или друг из друга, являются теми составными частями, из которых, в конечном счете, состоят все вещества природы».

Задача химии и сводится к установлению, из каких элементов состоит каждое сложное

вещество, и для решения этой задачи Бойль ввел качественный анализ. Химические элементы Бойля являются, таким образом, чем-то осязательным, реально существующим, исключающим возможность алхимических превращений. Работы Бойля и примененный им метод исследования путем опыта (впервые провозглашенный алхимиком Бэконом) оказали большое влияние на последующее развитие научной химии.

После Бойля ятрохимическое учение с его алхимическими элементами человеческого тела и крайне односторонней химической теорией толкования болезней не могло долго продержаться. К концу XVII в. ятрохимия уступила свое место теории флогистона.

Теория флогистона была предложена Георгом Шталем (1660—1734) для объяснения процессов горения горючих веществ, превращения металлов в «земли» (окалины) и получения металлов из руд. Эти вопросы чрезвычайно интересовали химиков в связи с быстрым развитием металлургии в XVII—XVIII вв.

По теории флогистона, горючие вещества и металлы содержат невесомое вещество — флогистон.

При горении угля и при прокаливании металлов флогистон удаляется в виде пламени, оставляя негорючую составную часть — золу (при горении угля) или окалину (при обжиге металла):

уголь = флогистон ↑ + зола
металл = флогистон ↑ + окалина.

Для превращения окалины в металл, очевидно, надо к «земле» присоединить флогистон, т. е. прокалить, например, с углем, который очень богат флогистоном:

окалина + уголь (флогистон) = металл.

Теория флогистона была первой (но в основе своей неверной) научной теорией, которая, опираясь на опыт, объясняла и обобщала целый ряд явлений.

Достаточно стройная и последовательная, она владела умами химиков целое столетие, но, как всякая ложная теория, вскоре после своего появления стала тормозом для развития науки. Первый, кто экспериментально доказал несостоятельность теории флогистона, был гениальный Ломоносов, который за много лет до Лавуазье пришел к принципиально правильному объяснению явлений горения и обжиге металлов.

Во флогистонный период в связи с проявлением особого интереса к вопросам горения настало время для изучения воздуха и газов. За это дело взялись талантливые химики, среди которых выдвинулись Кавендиш, Пристли, Шееле и другие.

Был найден легкий способ собирания газов в сосуды, наполненные водой или ртутью («пневматические ванны»); это дало возможность в короткий срок (1772—1776) подробно изучить важнейшие простые и сложные газы. «Пневматохимики», будучи правоверными «флогистиками», считали, что в состав всех газов входит флогистон, а сгорающий без остатка «горючий воздух» (водород) является чистым флогистоном. (На образование воды при горении водорода не обращали внимания.) Полученный (в 1774 г.) при накаливании окиси ртути (HgO) удивительный газ, «в котором ослепительно ярко горела свеча», считали воздухом, не содержащим флогистона; газ назвали «дефлогистированным воздухом»; интенсивное горение в нем объяснили той легкостью, с которой выделяющийся из горящей свечи флогистон может распространяться в воздухе при отсутствии в нем флогистона. Таким образом, историческое открытие «дефлогистированного воздуха» (кис-

Таблица 33. В лаборатории алхимика.

лорода), «которому суждено было ниспровергнуть всю флогистонную теорию и революционизировать химию, пропадало в руках флогистиков бесполезно» (Энгельс).

Опыты поразительного горения разных веществ в дефлогистированном воздухе были повторены «гениальным толкователем чужих открытий» Лавуазье (1743—1794). Он не был заражен флогистонной теорией, а потому и смог дать правильное объяснение реакции горения как реакции соединения вещества с кислородом. Это объяснение было подтверждено опытами количественного характера. Лавуазье раскрыл тайну образования воды при горении «горючего воздуха», которому дал рациональное название «водород». Вода, принимаемая за элемент, в действительности оказалась веществом сложным. После этих и других замечательных открытий флогистон, сбивавший химиков с верного пути и тормозивший развитие науки, был выброшен за борт. В науку победоносно входила новая, правильная кислородная теория горения Лавуазье.

Кислородная теория произвела полный переворот в основных химических понятиях; в самом деле, вещества, которые, по флогистонной теории, принимались за сложные (металлы, уголь), в действительности оказались простыми, а простые (окалины) — сложными (соединения металла с кислородом) и т. п.

Применяя весовой метод исследования, Лавуазье, подобно Ломоносову, но на восемнадцать лет позже него, пришел к открытию одного из основных законов природы — закона сохранения массы. В науке закон этот назвали именами обоих великих ученых — законом Ломоносова — Лавуазье.

Появление кислородной теории горения настойчиво потребовало пересмотра и приведения в систему всего накопленного фактического материала и разработки рациональной номенклатуры.

До Лавуазье соли, например, называли или по фамилии химика (глауберова, бертолетова и т. п.), или по местонахождению, цвету, вкусу (горькая, квасцы и т. п.). Поэтому одна и та же соль имела несколько разных и нередко ничего не говорящих названий.

В 1787 г. Парижская академия наук утвердила разработанную академической комиссией новую рациональную номенклатуру. Она очень проста и непосредственно указывает качественный химический состав вещества. Это та номенклатура, которой вы пользуетесь, занимаясь химией.

Разработка Лавуазье весового метода исследования скоро дала замечательные плоды. В результате многочисленных количественных анализов был открыт и сформулирован закон постоянства состава.

Лавуазье впервые поставил на ноги химию, которая в своей флогистонной форме стояла на голове

Энгельс

Логическим следствием открытия закона сохранения массы, закона постоянства состава, а затем закона кратных отношений явилась атомистическая теория Дальтона (1766—1844).

Теория Дальтона была одним из тех многих вариантов атомистических учений о строении веществ, которые предлагались учеными и философами начиная с Vв.до н. э.

Атомистические теории, материалистические по своей природе, а потому направленные против бога, проклинались церковью, преследовались светскими властями, на время заглушались, а потом воскресали в обновленном виде

Последней по времени перед дальтоновской атомистикой была корпускулярная, т. е., по-современному, атомно-молекулярная, теория гениального Ломоносова. Хотя она и была во многом глубже дальтоновской атомистики, но не получила распространения только потому, что ее время еще не настало: не хвата-

Таблица 34. Ломоносов за получением окрашенных стекол.

ло сведений о количественном составе сложных веществ, не были открыты основные законы химии. Атомистическая же теория Дальтона лишь спустя полстолетия преобразовалась в то атомно-молекулярное учение, которое является сейчас основной теорией химии.

С атомистической теории, как говорит Энгельс, начинается эпоха новой химии.

Новая химия входила в XIX столетие оснащенная атомистической теорией, основными химическими законами, весовым методом исследования, простой рациональной номенклатурой, доступной и понятной химической символикой и очищенной от всех мистических теорий. Последняя из них — теория «жизненной силы» — после блестящих синтезов органических веществ из неорганических была сдана в архив. Деление химии на неорганическую (минеральную) и органическую приобрело не принципиальное, а практическое значение.

Быстрое развитие химии в самых различных направлениях привело к выделению больших разделов в ряд самостоятельных дисциплин. Так, уже в начале XIX в. выделилась аналитическая химия. Во второй половине XIX в. развилась физическая химия, основоположником которой можно считать М. В. Ломоносова.

Теоретический материал физической химии в течение нескольких лет так разросся, что отдельные ее ветви в свою очередь развернулись в специальные «химии»: электрохимию, термохимию, фотохимию, коллоидную химию и т. д.

Проникновение химии почти во все другие дисциплины привело к появлению таких «отраслевых химий», как агрохимия, геохимия, биохимия и т. д.

Только одно это перечисление «химий» говорит об огромных успехах химии в XIX в. Этими успехами она обязана в основном таким поистине гениальным открытиям, как периодический закон Менделеева и структурная теория Бутлерова.

ЛЕТОПИСЬ ХИМИИ

ИСТОКИ ХИМИЧЕСКИХ ЗНАНИЙ

2500—2000 гг. до н. э. Проникновение меди с Востока в Европу. В южной Вавилонии изобретены весы — орудие для измерения количества золота и других материалов. Прообразом для них послужило коромысло носильщика тяжестей.

2000—1500 Наиболее древний сохранившийся образец стекла, найденный в одной из египетских пирамид.

Наиболее древний сохранившийся образец ковкого железа, обнаруженный в большой пирамиде Хеопса.

1300—1000 Герои поэм легендарного поэта Древней Греции Гомера облачаются в доспехи и сражаются оружием еще из меди, но сердца их тверды, как железо. Из других металлов Гомеру известны уже олово и свинец; известны закалка стали и действие навоза как удобрения.

1 в. до н. э. В материалистической поэме Лукреция Кара «О природе вещей» несуществующим богам противопоставляются невидимые атомы, с помощью которых объясняется все многообразие явлений окружающего мира, в том числе ветры и бури, распространение запахов, испарение и конденсация воды.

700—1000 Арабский алхимик Джабир и его последователи описывают химические операции и вещества, найденные алхимиками в процессе их безуспешных попыток превратить неблагородные металлы в золото: кристаллизацию и фильтрование; серную, азотную и уксусную кислоты, различные соли.

1000—1200 В «Книге о весах мудрости», которые характеризуются как «критерий правильного суждения», арабский ученый Алказини приводит удельные веса 50 различных веществ.

1300—1400 В Европе вторично изобретен порох — первое взрывчатое вещество, использованное человеком. Применение пороха привело к революции в военном деле. В Китае порох был изобретен в начале нашей эры.

1452—1519 Великий итальянский художник Леонардо да Винчи путем сжигания свечи под опрокинутым над водой сосудом доказывает, что при сгорании воздух расходуется, но не весь.

1493—1541 Парацельс преобразует алхимию в ятрохимию. От него идет первое, затем многократно повторявшееся наблюдение, что

для горения необходим воздух, а металлы при обращении в окалины увеличивают свой вес.

1600—1650 Ван-Гельмонт открывает газы. Ван-Гельмонт объявил весы самым необходимым прибором для химика и, используя их, установил, что растворившиеся в кислоте металлы можно вновь выделить из раствора в том же самом количестве.

ЗАРОЖДЕНИЕ НАУЧНОЙ ХИМИИ

1650—1700 В книге «Химик-скептик» английский ученый Бойль наносит сокрушительный удар алхимии и вводит представление о химическом элементе как основном понятии химии. Бойль создал также основы химического анализа.

1700—1750 Шталь развивает теорию флогистона.

1756 Ломоносов формулирует закон сохранения массы и, опираясь на него, дает правильное объяснение обжигу металлов и горению. Ломоносов формулирует атомно-молекулярную теорию и усматривает центральную задачу химии в изучении «внутреннего нечувствительных частиц строения».

1766 Кавендиш открывает и подробно исследует водород, обнаруживая, в частности, его необыкновенно малый удельный вес по сравнению с воздухом.

1771 Пристли в числе других новых газов открывает кислород и превращение углекислого газа растениями в воздух, вновь годный для дыхания.

1775 Лавуазье создает кислородную теорию горения и обжига металлов, тем самым закладывая фундамент антифлогистической химии, и устанавливает, что углекислый газ — это соединение углерода с кислородом.

1781 Лавуазье проводит первые измерения количества тепла, выделяющегося при химических реакциях (горения) с помощью изобретенного им ледяного калориметра.

1783 Лавуазье окончательно ниспровергает теорию флогистона и завершает кислородную теорию горения и обжига, доказав, что вода представляет собой соединение водорода с кислородом. Попутно, выполняя поручение академии об «усовершенствовании воздухоплавательных машин», он находит дешевый способ получения для них водорода из водяного пара путем пропускания через раскаленные железные стружки.

1783 Первый подъем наполненного водородом воздушного шара.

1787 Лавуазье создает современный химический язык.

1790 Русский акад. Т. Е. Ловиц, еще опираясь на теорию флогистона, открывает явление поглощения (адсорбцию) углем растворенных веществ.

УТВЕРЖДЕНИЕ В ХИМИИ АТОМНО-МОЛЕКУЛЯРНОГО УЧЕНИЯ

1801—1808 Семилетний спор между Бертолле и Пру по вопросу: одинаков или изменчив весовой состав различных образцов одного и того же вещества. Спор кончился победой Пру — утверждением его закона постоянства состава, которому автор дает мистическое истолкование: «Мы должны усматривать невидимую руку, которая соблюдает баланс в образовании соединений, природа никогда не творит их иначе, чем с весами в руках».

1803—1804 Развивая атомно-молекулярное учение, Дальтон вводит в химию понятие об атомном весе химических элементов и публикует первую таблицу атомных весов, вычисленных из весового состава химических соединений, срывая завесу таинственности с закона постоянства состава. «Учение о постоянстве состава представляется мистическим, если мы не признаем атомной гипотезы» (Дальтон).

1805—1808 Изучая объемные соотношения, в которых реагируют газы, Гей-Люссак устанавливает закон объемных отношений: при химических реакциях между газами объемы расходующихся и образующихся газов (каждого в отдельности) относятся, как простые целые числа.

1811 Авогадро формулирует гипотезу: в равных объемах разных газов при одинаковых условиях содержится одинаковое число молекул. С помощью этой гипотезы он объясняет числовой материал (объемные соотношения) Гей-Люссака, но при условии, что молекулы таких газов, как водород, кислород, азот, хлор, принимаются состоящими из двух атомов. Однако эта гипотеза отвергается его современниками во главе с Берцелиусом.

1812 Берцелиус выдвигает гипотезу о наличии у атомов электрических зарядов: положительных — у атомов водорода и металлов, отрицательных — у атомов остальных неметаллов. С помощью этой гипотезы он объясняет электролиз и образование химических соединений. Гипотеза Берцелиуса исключает сцепление друг с другом одинаковых атомов, вследствие чего она не совместима с гипотезой Авогадро.

1814 Выступая признанным преемником Дальтона, Берцелиус публикует новую таблицу атомных весов 46 уже известных химических элементов и данные о составе 2000 соединений и вводит химическую символику, опирающуюся на атомно-молекулярную теорию. Но бесспорного способа вычисления атомных весов он не находит, и это порождает со временем все усиливающиеся разногласия между последователями химической атомистики, перерастающие в неверие в познаваемость атомов.

1817—1829 Доберейнер группирует известные химические элементы по тройкам в естественные семейства — «триады» и формулирует закон триад: атомный вес промежуточного по химическим свойствам элемента каждой триады равен среднему арифметическому из атомных весов крайних элементов.

1822 Вёлер открывает первый случай изомерии — существования нескольких веществ с одним и тем же составом молекулы. Это явление было предугадано в атомистике Ломоносова, но исключалось атомистикой Дальтона.

1828 Вёлер случайно синтезирует первое органическое вещество — мочевину. Это рассеяло убеждение в том, что органические вещества могут возникать лишь в живых организмах под влиянием таинственной жизненной силы, и открыло тем самым возможность соревнования с природой в деле создания органических веществ. Но это лишь первые приготовления к вторжению химии в мир органических соединений. «Органическая химия может в настоящее время кого угодно свести с ума... она представляется дремучим лесом, полным чудесных вещей, огромной чащей, без выхода, без конца, куда не осмеливаешься проникнуть» (Вёлер).

1834 Дюма обнаруживает, что при отбелке хлором свечей водород в воске частично замещается хлором. Это — первый удар по электрохимической теории Берцелиуса, так как, по Берцелиусу, атомы хлора и водорода заряжены разноименными зарядами и замещать друг друга не должны.

1848 Пастер открывает новый вид изомерии — оптическую изомерию.

1852 Франкланд формулирует новое свойство атомов — валентность.

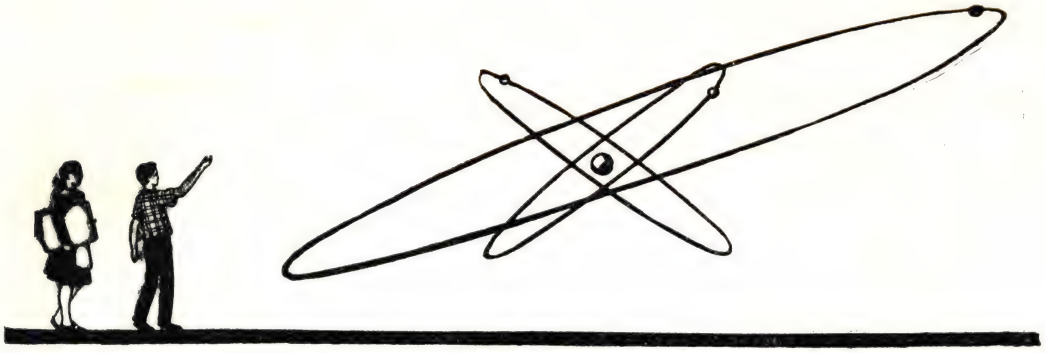
1857 Кекуле устанавливает четырехвалентность углерода и наличие в органических соединениях цепочек из сцепленных друг с другом атомов углерода. В результате электрохимическая теория Берцелиуса окончательно рушится. Но возможность установления структуры молекул Кекуле отрицает.

1860 Первый всемирный съезд химиков, на котором защитники химической атомистики в острой борьбе с ее противниками одерживают победу. Выход из кризиса найден в виде первого бесспорного метода определения атомных весов, основанного на воскрешенной из мрака забвения гипотезе Авогадро. «В 50-х годах одни принимали атомный вес кислорода равным 8, другие — 16. Смута, сбивчивость господствовали. В 1860 г. химики всего света собрались в Карлсруэ для того, чтобы достичь соглашения, единообразия. Присутствовав на этом конгрессе, я живо помню, как велико было разногласие и как тогда последователи Жерара горячо проводили следствия закона Авогадро. Истина, в виде закона Авогадро — Жерара, при посредстве конгресса, получила более широкое распространение и скоро затем покорила все умы. Тогда сами собою укрепились новые атомные веса, и уже с 70-х годов они вошли во всеобщее употребление» (Менделеев).

1861 Бутлеров создает структурную теорию органических соединений, объясняет явление изомерии и открывает путь к планомерному созданию органических соединений, следуя которому органическая химия начинает одерживать одну победу за другой в соревновании с природой за создание материальных ценностей для удовлетворения потребностей людей.

1869 Возобновившиеся после конгресса в Карлсруэ поиски связи между химическими свойствами элементов и их атомными весами приводят к величайшему после самой атомистики обобщению химии — открытию Менделеевым периодического закона, дающего путь к предсказанию и планомерным поискам еще не открытых химических элементов и новых химических соединений.

1875 Был открыт первый из предсказанных Менделеевым химических элементов — галлий.



Атомы — кирпичи мироздания

ПЕРИОДИЧЕСКИЙ ЗАКОН Д. И. МЕНДЕЛЕЕВА

В истории развития человеческого знания известно много великих подвигов. Но очень немногие из них можно сопоставить с тем, что сделал Дмитрий Иванович Менделеев — один из величайших гениев мира. Научный подвиг Менделеева не имеет равных, и значение его не только не стирается неумолимым временем, но растет и растет. И никто пока не может сказать, когда будет до конца исчерпано все содержание одного из величайших в науке обобщений — периодического закона Менделеева.

ОТКРЫТИЕ ВЕЛИКОГО ЗАКОНА

Начало периодического закона было очень скромным: 17 февраля 1869 г., собираясь в дорогу, проф. Петербургского университета Дмитрий Иванович Менделеев на обороте письма, в котором его просили приехать и помочь производству, записал впервые набросок таблицы химических элементов.

В этой таблице была сделана попытка расположить элементы в порядке возрастания их атомных весов и намечена периодическая повторяемость их свойств.

Этот день должен быть отмечен в истории науки как начало новой эры. Это день, когда зародились самые смелые предсказания о существовании в мироздании новых, никому не известных элементов. К нему восходят истоки наших познаний об атоме и его строении, которые, развиваясь, привели в наши дни человечество к овладению атомной энергией.

В этот день Менделеев отложил свою поездку. Он записал на отдельных карточках все известные тогда химические элементы с их важнейшими химическими и физическими свойствами. Располагая карточки в различном порядке, сообразуясь с их химическими свойствами и со свойствами их соединений, он составил свой первый вариант естественной системы химических элементов.

Вот что, по словам самого Менделеева, он в этот день сделал: «Невольно зародилась мысль о том, что между массою и химическими элементами необходимо должна быть связь. А так как масса вещества, хотя и не абсолютная, а лишь относительная, выражается окончательно в весе всех атомов, то надо искать функционального соответствия между индивидуальными свойствами элементов и их атомными весами. Искать же чего-либо, хотя бы грибов, или какую-нибудь зависимость, нельзя иначе, как смотря и пробуя. Вот я и стал подбирать, написав на отдельных карточках элементы с их атомными весами и коренными свойствами, сходные элементы и близкие атомные веса, что быстро и привело к тому заключению, что свойства элементов стоят в периодической зависимости от их атомного веса, причем, сомневаясь во многих неясностях, я ни минуту не сомневался в общности сделанного вывода, так как случайности допустить было невозможно».

С этого дня Дмитрий Иванович забросил все другие занятия. Он с огромным напряжением отдался только работе над периодическим законом. 1 марта 1869 г. он разослал многим ученым в России и за границей небольшой листок, содержащий первый вариант периодической системы — «Опыт системы элементов», передал своему другу проф. Н. А. Меншуткину доклад под названием «Соотношение свойств с атомным весом элементов» и, наконец, уехал на завод.

Впервые сообщение о величайшем открытии было сделано на заседании Русского химического общества 6 марта. Вместо автора его доклад прочел Меншуткин.

В протоколе заседания Русского химического общества от 6 марта 1869 г. появилась краткая сухая запись:

«Н. Меншуткин сообщает от имени Д. Менделеева опыт системы элементов, основанный на их атомном весе и химическом сходстве. За отсутствием Д. Менделеева обсуждение этого сообщения отложено до следующего заседания...»

Этот равнодушный протокол отразил отношение ученых-современников, впервые услышавших о периодической системе. Она была ими просто не понята, они не обратили на нее внимания.

КАК БЫЛ ОТКРЫТ ПЕРИОДИЧЕСКИЙ ЗАКОН

Действительно ли было все так просто, как рассказывал Менделеев? На первый взгляд кажется, что нет ничего трудного в том, чтобы, написав на отдельных карточках названия элементов, их атомные веса и их свойства, расположить их по порядку. Ведь из всех возможных способов, какими только можно было комбинировать эти карточки, расположение в ряд по возрастанию атомного веса, начиная с элемента с наименьшим весом,— наиболее простое... Это — первое, что каждому может прийти в голову. Подметить же закономерность в изменении свойств правильно расположенных элементов не так уж трудно. Ведь эти свойства и во времена Менделеева были хорошо известны.

В чем же заслуга Менделеева?

Забудьте на некоторое время все, что вы уже знаете по химии, все, что вы успели узнать в школе о периодической системе, вообразите, что вы перенеслись в середину прошлого века и знаете только то, что знали химики — современники Менделеева.

К этому времени было открыто и изучено шестьдесят три химических элемента (значит, свыше тридцати еще были неизвестны).

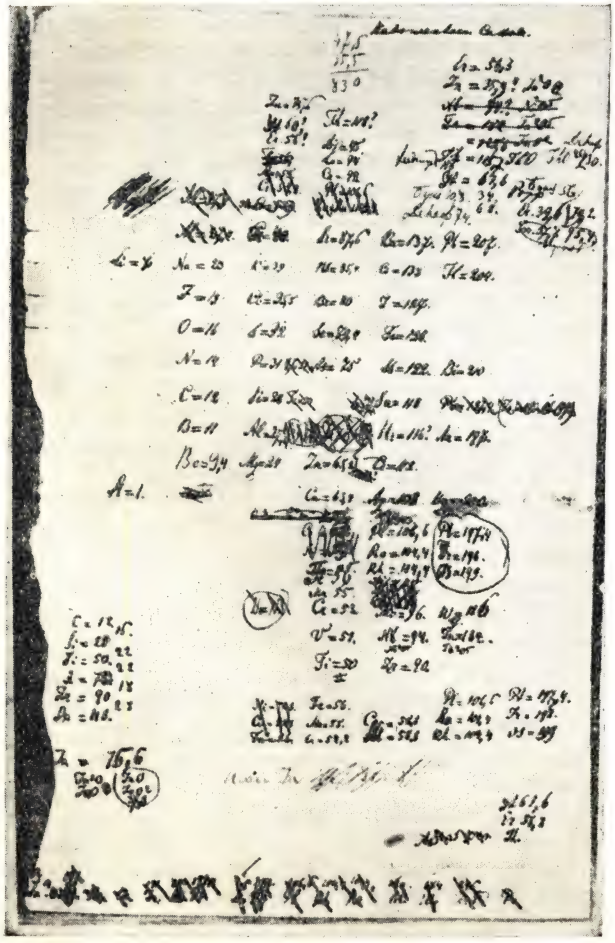
Были найдены способы определения атомного веса, но делали это с недостаточной точно-

стью и далеко не для всех элементов правильно. Тогда это была еще очень трудная задача.

Так, атомные веса у девяти элементов были определены неверно, причем тогда об этом, конечно, никто не подозревал. Значит, приблизительно из девяти десятков элементов, существовавших в природе, химики более или менее хорошо изучили около пятидесяти.

Как бы должен был расположить свои карточки Менделеев?

Самый малый атомный вес у водорода (H). Он равен единице. Следующим в то время был литий (Li). Его атомный вес — около 7. За ним шел бор (B) с атомным весом около 11, углерод (C) с атомным весом 12, азот (N) с атомным весом 14, бериллий(Be) с атомным весом тоже 14, далее кислород (O)—16, фтор (F) — 19 и т. д.



Первый собственноручный набросок периодической системы элементов, сделанный Д. И. Менделеевым 17 февраля 1869 г.

Значит, карточки с элементами, если бы их расположить по возрастанию атомного веса, должны были бы составить вот такой ряд в начале таблицы:

H 1	Li 7	B 11	C 12	N 14	Be 14
O 16	F 19	Na 23	Mg 24	Al 27	Si 28
P 31	S 32	Cl 35			

На этих карточках написаны округленные атомные веса с такой точностью, с какой они были известны в то время.

А как расположил свои карточки с элементами Менделеев?

Поместив под водородом литий, он рядом с литием... положил карточку, на которой было написано:

Be 9 а не Be 14

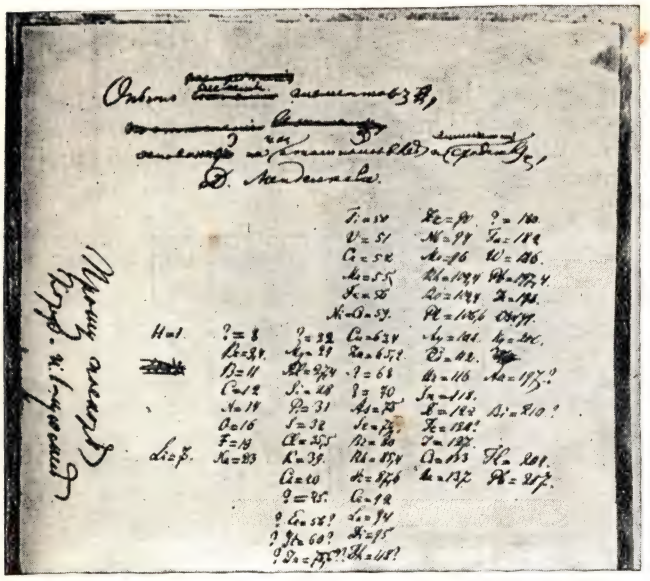
Но ведь в те времена каждый химик хорошо знал, что атомный вес бериллия — 14. Почему же Менделеев, не проводя никаких исследований по определению атомного веса этого металла, смело изменил его?

Вот как он расположил карточки в начале таблицы:

H 1						
Li 7	Be 9	B 11	C 12	N 14	O 16	F 19
Na 23	Mg 24	Al 27	Si 28	P 31	S 32	Cl 35

При таком расположении друг под другом оказались химически сходные элементы. Металл литий похож на металл натрий: оба мягкие, легко режутся ножом, бурно реагируют с водой, образуя щелочи.

Бериллий и магний схожи друг с другом. У фтора много общего с хлором — это едкие удушливые газы, которые образуют с металлами совершенно сходные соединения.



С этой рукописи был впервые сделан типографский набор первой в мире менделеевской таблицы химических элементов.

При таком расположении совершенно четко проявляется периодичность в свойствах элементов. В двух первых коротких периодах менделеевской таблицы правильно чередуются элементы с аналогичными свойствами.

Но как же все-таки они были построены Менделеевым? Пожалуй, он был неправ, когда утверждал, что расположил элементы по их атомному весу. Если бы он действительно расположил их по возрастанию тех атомных весов, которые были и з в е с т н ы науке в то время, то никакого периодического закона обнаружить было бы невозможно даже в первых рядах таблицы.

А ведь Менделеев предсказал на основании периодического закона правильный атомный вес бериллия. Позднейшие исследования подтвердили это предсказание.

Продолжим построение еще одного ряда таблицы после хлора. Вот элементы и их атомные веса, известные в середине прошлого века: калий (K) — 39, кальций (Ca) — 40, ванадий (V) — 51, хром (Cr) — 52, титан (Ti) — 52, марганец (Mn) — 55.

В соответствии со значениями известных в то время атомных весов нужно было бы ожидать следующего чередования карточек после хлора:

K	Ca	V	Cr	Ti	Mn
39	40	51	52	52	55

ТАЙНА ПУСТОГО МЕСТА

Но, продолжая построение своей таблицы, Менделеев разместил карточки с элементами совсем не так.

Вот как он их расположил:

H						
1						
Li	Be	B	C	N	O	F
7	9	11	12	14	16	19
Na	Mg	Al	Si	P	S	Cl
23	24	27	28	31	32	35
K	Ca	?	Ti	V	Cr	Mn
39	40		48	51	52	55

Под карточкой натрия оказалась карточка с очень похожим на него калием; под магнием — также похожий на него кальций. А затем Менделеев совершил удивительный поступок: под алюминием помещена п у с т а я карточка.

Вслед за пустой — карточка с титаном, но с атомным весом 48, а не 52, как тогда считали.

Следовательно, и в третьем ряду таблицы элементы не были расположены согласно известным в то время атомным весам.

Третий период в таблице Менделеева — длинный. За марганцем идут железо (Fe) — 56, кобальт (Co) — 59, никель (Ni) — 59; далее — медь (Cu) — 63, цинк (Zn) — 65. Но вот вслед за цинком ученый снова оставил в своей таблице подряд два п у с т ы х места, за которыми следовали хорошо известные элементы — мышьяк, селен и бром.

Из того, что мы разобрали, совершенно очевидно, что все обстояло не так просто, как скромно рассказывал Менделеев.

Нельзя согласиться, что Менделеев просто располагал элементы в порядке возрастания атомных весов. Скорее наоборот: истинные атомные веса элементов он устанавливал по их расположению в периодической системе.

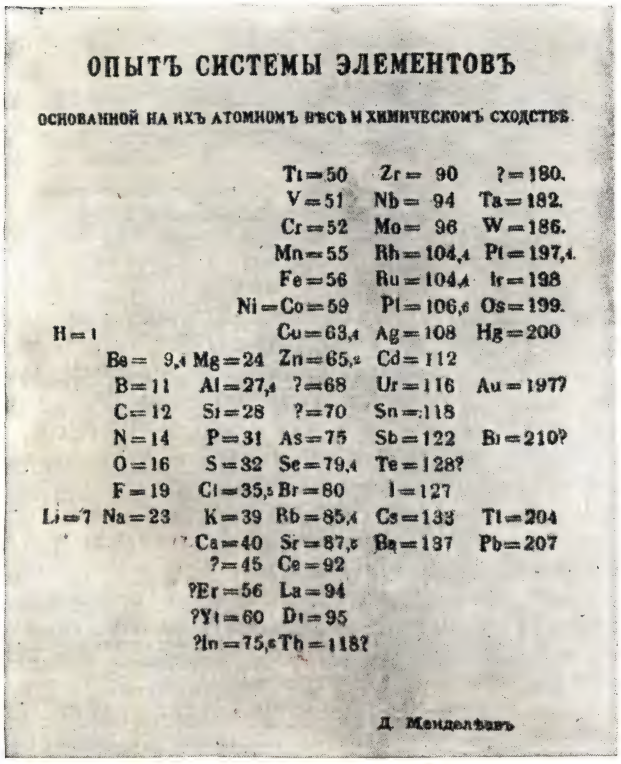
Одних только фактов, которые были известны до Менделеева, как бы их ни комбинировать, не было достаточно для открытия одного из величайших законов природы — периодического закона. Нужно было не только знание накопленного в течение многих веков химического опыта. Надо было обладать гениальностью и особенно тонкой интуицией, чтобы охватить всю необозримую совокупность бесчисленного множества химических явлений и глубоко почувствовать скрытую в них закономерность.

Нужно было обладать особой революционной смелостью, чтобы, осознав эту закономерность, смело исправлять старое и предсказывать новое в науке, основываясь на убеждении в своей правоте.

ВЕЛИКОЕ ПРЕДСКАЗАНИЕ

Что же означают пустые места в таблице Менделеева?

Пробелы ли это в природе и потому химики не нашли элементов, подходящих к этим пустым клеткам таблицы, или же это пробелы в человеческом знании о природе?



ОПЫТЪ СИСТЕМЫ ЭЛЕМЕНТОВЪ

ОСНОВАННОЙ НА ИХЪ АТОМНОМЪ ВѢСѢ И ХИМИЧЕСКОМЪ СХОДСТВѢ.

			Ti=50	Zr= 90	?=180.
			V=51	Nb= 94	Ta=182.
			Cr=52	Mo= 96	W=186.
			Mn=55	Rh=104,4	Pt=197,4.
			Fe=56	Ru=104,4	Ir=198
			Ni=Co=59	Pl=106,6	Os=199.
H=1			Cu=63,4	Ag=108	Hg=200
	Be= 9,4	Mg=24	Zn=65,2	Cd=112	
	B=11	Al=27,4	?=68	Ur=116	Au=197?
	C=12	Si=28	?=70	Sn=118	
	N=14	P=31	As=75	Sb=122	Bi=210?
	O=16	S=32	Se=79,4	Te=128?	
	F=19	Cl=35,5	Br=80	I=127	
Li=7	Na=23	K=39	Rb=85,4	Cs=133	Tl=204
		Ca=40	Sr=87,6	Ba=137	Pb=207
		?=45	Ce=92		
		?Er=56	La=94		
		?Yt=60	Di=95		
		?In=75,6	Th=118?		

Д. Менделѣевъ

«Первые мысли о периодичности вложены мною в листок... который 1-го марта 1869 года был послан мною многим ученым» (Менделеев). Это самая первая таблица периодической системы элементов. Она далеко еще не закончена. У нее необычная и неудобная форма. В ней еще можно заметить много неточностей. Замечательно то, что уже в этой самой первой таблице оставлены и отмечены знаком вопроса пустые места.

Существует ли, например, в природе элемент, тяжелее кальция и легче титана по атомному весу и похожий на бор и алюминий по химическим свойствам?

У Менделеева сомнений не было. Каждое место в таблице соответствует определенному химическому элементу, который должен обязательно существовать.

В 1871 г. в журнале Русского химического общества появилась большая работа Менделеева. Она называлась «Естественная система элементов и применение ее к указанию свойств неоткрытых элементов».

Вряд ли в мировой научной литературе когда-либо была опубликована статья, похожая на эту! В ней Менделеев описывает три никем, никогда и нигде в мире не виданных химических элемента, причем описывает их так обстоятельно, как не смог бы это сделать иной ученый-исследователь, державший в руках их соединения и посвятивший долгие годы опытному изучению их в лаборатории.

Каким же путем периодический закон дает возможность описывать неведомое? Каким образом место в таблице определяет свойства элемента?

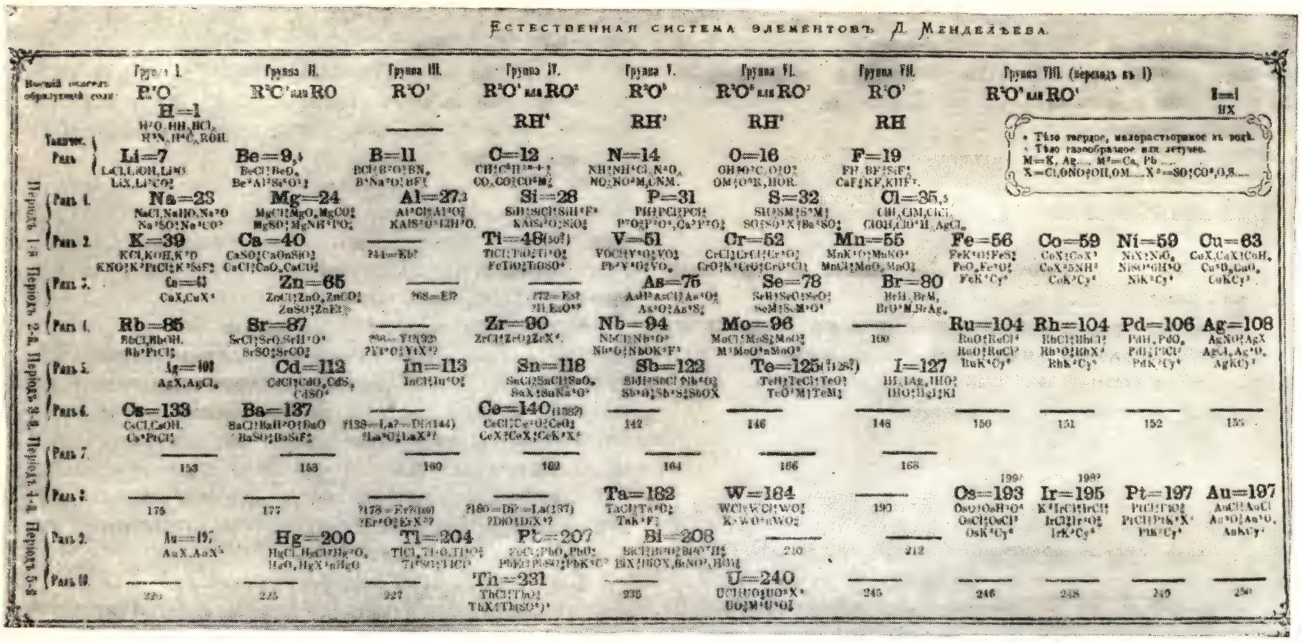
Лучше всего это можно понять, если попытаться, по примеру Менделеева, сравнить свойства элемента пустой клетки со свойствами его соседей.

Выделим из таблицы ту часть, которая включает пустые места и окружающие их элементы.

	II	III	IV	V
2	Be 9	B 11	C 12	N 14
3	Mg 24	Al 27	Si 28	P 31
4	Ca 40	?	Ti 48	V 51
	Zn 65	?	?	As 75
5	Sr 88	Y 89	Zr 91	Nb 94
	Cd 112	In 114	Sn 119	Sb 120

Пустая клетка между кальцием и титаном находится в начале четвертого периода, а две пустые клетки, расположенные рядом между цинком (Zn) и мышьяком (As), находятся в конце этого периода.

Гипотетический (предполагаемый — от слова «гипотеза») элемент, который должен был



Эта таблица была помещена Дмитрием Ивановичем в первом издании его замечательного учебника «Основы химии» (1871). В ней еще очень много пустых мест, и совсем отсутствует нулевая группа. Особенно интересно, что в этой таблице уже предусмотрены места для трансурановых элементов.

занимать первое пустое место, Менделеев назвал экабор. В таблице он следует за кальцием. Тот элемент, который должен занять пустое место около цинка, он назвал экаалюминием, а соседний с ним — экасилицием.

Пустое место экабора находится между кальцием (атомный вес 40) и титаном (атомный вес 48). Следовательно, атомный вес экабора должен быть близок к среднему значению:

$$\frac{40+48}{2}=44.$$

С кислородом он должен давать окись состава, аналогичного окиси бора и алюминия: X_2O_3. Сам экабор должен быть легким металлом, он ведь стоит между двумя легкими металлами — кальцием и титаном. Плотность соседей экабора по ряду позволяет определить и его плотность. Для кальция она равна 1,6, для титана - 5,2. Поэтому плотность экабора должна быть приблизительно равна:

$$\frac{1,6+5,2}{2}=3,4.$$

Экабор должен иметь бесцветные соли, потому что соседи образуют бесцветные соединения.

Из растворов его солей экабор можно осаждать содой, его углекислая соль будет нерастворимой, потому что его соседи образуют нерастворимые углекислые соли.

Попробуем описать и еще один элемент, пустое место которого находится рядом с цинком,- экаалюминий.

Между цинком и мышьяком Менделеев оставил два пустых места. Атомный вес мышьяка — 75, цинка — 65. Нетрудно сообразить, что экаалюминий должен обладать атомным весом около 68. Он помещается в третьем столбце рядом с металлом цинком. В этом столбце находится алюминий — тоже металл, и экаалюминий должен быть на него похож. Значит, экаалюминий будет тоже металлом.

Плотность его мы бы определили по известной плотности ближайших соседей, учитывая лишь, что рядом с экаалюминием имеется еще одно пустое место — экакремний. Плотность экаалюминия должна быть близка к 6,0. Так же как и экабор, экаалюминий можно осадить содой из растворов его солей.

Соединения алюминия с хлором при высокой температуре обладают летучестью, и хлористое соединение экаалюминия должно быть также летучим.

Предсказание свойств экаалюминия мы могли бы продолжить. Но для этого нам нужно

было бы знать получше химию уже открытых и хорошо изученных элементов.

Вот какими словами Менделеев заканчивает описание свойств экаалюминия: «Можно надеяться, что он будет открыт спектральным исследованием подобно тому, как открыты следующие за ним индий и таллий...»

Таким образом, Менделеев не только описал неведомое, но и предсказал, как оно будет познано. Но современники не разделяли уверенности Менделеева. Они приняли великое открытие холодно и не смогли его оценить.

КАК ОПРАВДАЛИСЬ ПРЕДСКАЗАНИЯ МЕНДЕЛЕЕВА

В 1875 г. весь мир облетело известие: молодой французский ученый-спектроскопист Лекок де Буабодран из минерала, добытого в Пиренейских горах, выделил новый элемент. На след его Буабодрана навела слабая фиолетовая линия в спектре минерала, которую нельзя было приписать ни одному из известных химических элементов. В честь своей родины, которая раньше называлась Галлией, Буабодран назвал новый элемент галлием. Галлий — очень редкий металл, и Буабодрану стоило большого труда добыть его в количестве немногим больше булавочной головки. Но Буабодран оказался большим искусником. Он ухитрился с этой крупинкой проделать много интересных опытов и подробно описал новый металл: удельный вес галлия, температуру плавления, соединение с кислородом и даже соли.

Каково же было удивление Буабодрана, когда через Парижскую академию наук он получил письмо с русской маркой, в котором сообщалось: в описании свойств галлия все верно, за исключением удельного веса: галлий тяжелее воды не в 4,7 раза (как утверждал Буабодран), а в 5,9 раза.

Неужели кто-то другой открыл галлий раньше?

Озадаченный Буабодран заново определяет удельный вес галлия, подвергнув металл более тщательной очистке. И что же, оказывается, он ошибся, а автор письма — это был, конечно, Менделеев, который никогда не видел галлия в глаза,— прав: удельный вес галлия равен не 4,7, а 5,9.

Вскоре (в 1879 г.) два скандинавских химика почти одновременно нашли новый неизвестный элемент в редком минерале гадолините. Его назвали скандий. Когда же были изучены его свойства, то стало совершенно очевидно, что это не что иное, как давно известный по предсказаниям Менделеева, экабор.

А через пятнадцать лет после предсказания Менделеева (в 1886 г.) немецкий химик Винклер открыл еще один новый элемент и назвал его германием.

На этот раз не пришлось Менделееву самому указывать, что и этот вновь открытый элемент был им предсказан ранее.

В своем сообщении Винклер отметил, что его германий полностью соответствует экасилицию Менделеева.

Он писал в своей работе: «Едва ли можно найти иное более поразительное доказательство справедливости учения о периодичности, как осуществление гипотетического экасилиция во вновь открытом элементе. Это не просто подтверждение смелой теории, здесь мы видим очевидное расширение химического кругозора, мощный шаг в области познания».

Винклер не искал германия по опубликованным Менделеевым его приметам. Он наткнулся на него случайно. Выходило, что все еще не открытые химические элементы как бы взяты на учет — их столько, сколько пустующих клеток в периодической таблице Менделеева. Оказалось, что не только в точности известны приметы каждого из них, но даже заранее можно предсказать, в каких минералах нужно их искать, какими химическими способами следует извлекать эти элементы из минералов, в которых они скрываются.

Найдите в периодической таблице клетку № 75. Она сейчас уже не пустая: в нее вписан химический элемент, носящий имя «рений»(Re). Вряд ли этот металл был бы открыт, если бы периодическая таблица Менделеева не подсказала, что его нужно искать в платиновых рудах и что его можно извлечь из них в виде очень летучего соединения с кислородом (окисла).

Затруднение было лишь в том, что платиновые руды очень дóроги. Но здесь на помощь ученым, решившим во что бы то ни стало открыть новый металл, пришли требования практики — нужды промышленности, производившей электрические лампочки. Ученые выяснили, что если металл, который они ищут, существует в природе, то нечего будет и думать изготовлять из него машины, так как этот металл будет чрезвычайно дорог. А впрочем... взгляните: что за элемент вписан в соседнюю клетку, № 74? Это вольфрам, самый тугоплавкий из металлов. Он не плавится и почти не испаряется даже при белом калении. Вот почему именно из

Періодическая система элементовъ по группамъ и рядамъ.

Ряды	ГРУППЫ ЭЛЕМЕНТОВЪ: 0	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII
1	—	Водородъ. H 1,008	—	—	—	—	—	—	
2	Гелій. He 4,0	Литій Li 7,03	Бериллій. Be 9,1	Боръ. B 11,0	Углеродъ C 12,0	Азотъ. N 14,01	Кислородъ. O 16,00	Фторъ. F 19,0	
3	Неонъ Ne 19,9	Натрій Na 23,05	Магній. Mg 24,36	Алюминій Al 27,1	Кремній. Si 28,2	Фосфоръ. P 31,0	Сѣра S 32,06	Хлоръ Cl 35,45	
4	Аргонъ. Ar 38	Калій. K 39,15	Кальцій. Ca 40,1	Скандій. Sc 44,1	Титанъ. Ti 48,1	Ванадій. V 51,2	Хромъ. Cr 52,1	Марганецъ. Mn 55,0	Желѣзо. Fe 55,9 / Кобальтъ. Co 59 / Никель. Ni 59 (Cu)
5		Мѣдь Cu 63,6	Цинкъ Zn 65,4	Галлій Ga 70,0	Германій Ge 72,5	Мышьякъ. As 75	Селенъ Se 79,2	Бромъ Br 79,95	
6	Криптонъ. Kr 81,8	Рубидій Rb 85,5	Стронцій. Sr 87,6	Иттрій. Y 89,0	Цирконій Zr 90,6	Ніобій Nb 94,0	Молибденъ. Mo 96,0	—	Рутеній. Ru 101,7 / Родій Rh 103,0 / Палладій Pd 106,5 (Ag)
7		Серебро Ag 107,93	Кадмій Cd 112,4	Индій Jn 115,0	Олово. Sn 119,0	Сурьма. Sb 120,2	Теллуръ Te 127	Іодъ J 127	
8	Ксенонъ. Xe 128	Цезій. Cs 132,9	Барій. Ba 137,4	Лантанъ La 138,9	Церій. Ce 140,2	—	—	—	— — —
9		—	—	—	—	—	—	—	
10	—	—	—	Иттербій Yb 173	—	Танталъ Ta 183	Вольфрамъ. W 184	—	Осмій. Os 191 / Иридій. Jr 193 / Платина. Pt 194,8 (Au)
11		Золото. Au 197,2	Ртуть. Hg 200,0	Талій Tl 204,1	Свинецъ. Pb 206,9	Висмутъ. Bi 208,5	—	—	
12	—	—	Радій. Rd 225	—	Торій. Th 232,5	—	Уранъ. U 238,5		
Высшіе солеобразные окислы:	R	R^2O	RO	R^2O^3	RO^2	R^2O^5	RO^3	R^2O^7	RO^4
Высшія газообразныя водородныя соединенія:					RH^4	RH^3	RH^2	RH	

Сравните периодическую таблицу, приложенную к восьмому изданию «Основ химии» (1906), с тем вариантом таблицы, который был помещен в первом издании. На пустых прежде местах находятся уже новые элементы, открытые точно в соответствии с предсказаниями великого ученого. Добавлена и новая, нулевая, группа. Элементы, находящиеся в ней, также были открыты по методу Менделеева.

вольфрама изготовляются тончайшие, почти невидимые нити накала («волоски») электролампочек, которые сейчас освещают наши дома взамен старинных чадящих лучин, свечей и керосиновых ламп. Сотни, тысячи часов служит нам такая лампочка, пока «волосок» от постоянного сильного раскаливания не порвется: лампочка «перегорела».

Прежде чем «волоски» электролампочек стали изготовлять из вольфрама, они изготовлялись из металла осмия (№ 76).

Теперь вам понятно, в чем дело, почему для производства электролампочек было очень важно найти этот еще не открытый металл.

Он должен был занять место в таблице между осмием и вольфрамом. Возможно, следовательно, что новый металл тоже пригодится для изготовления нитей накала. А много ли металла уходит на эти почти невидимые, почти невесомые нити? Ничего, если металл будет и дороговат; пусть только нить дольше не перегорает.

Элемент № 75 (рений), существование которого было предсказано Менделеевым (он назвал его двимарганец), таким образом был открыт учеными. Для нитей накала он оказался очень подходящим металлом.

ВЕЛИКОЕ ИСПЫТАНИЕ ПЕРИОДИЧЕСКОГО ЗАКОНА

На небольшом клочке бумаги в 1869 г. Менделеев набросал табличку элементов с нечетной и четной валентностью. Он отметил на ней недостающие элементы с атомным весом 20 и 36 и поставил возле каждого отчетливые вопросительные знаки. Таких элементов в то время известно не было.

Работая над развитием периодической таблицы, он не оставил в ней места для этих элементов и никогда, по крайней мере публично, к ним больше не возвращался. Этот листок остался неиспользованным в архиве ученого.

Годом ранее на заседании Парижской академии наук 26 октября 1868 г. были прочитаны одно за другим два письма.

Одно было прислано из Индии, от астронома Жансена, другое — из Англии, от астронома Локьера. Оба они сообщали, что в спектре сол-

нечных протуберанцев они (независимо друг от друга) обнаружили новую желтую линию, которая не может принадлежать ни одному химическому элементу из существующих на земном шаре.

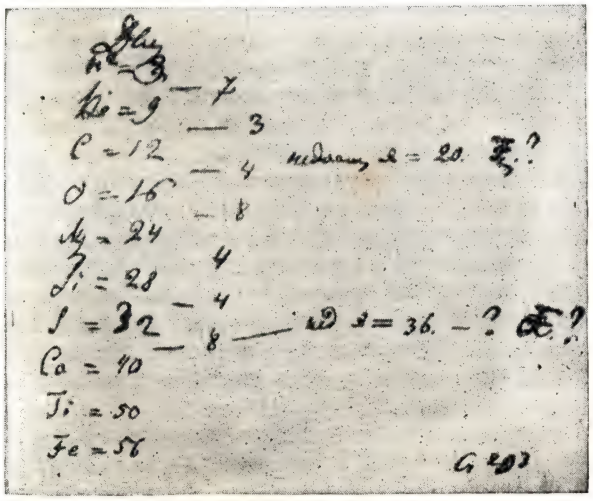
В честь этого удивительного совпадения пораженная академия даже изготовила золотую медаль с портретами обоих ученых на одной стороне и изображением бога солнца Аполлона на другой.

Было решено, что новая линия в спектре принадлежит какому-то особому «небесному» элементу.

Он был назван именем Солнца — гелий.

Спустя двадцать пять лет после открытия гелия на Солнце знаменитый английский физик Релей обнаружил очень странный факт: литр чистого азота, добытого из воздуха, тяжелее, чем литр того же азота, полученного из любого азотного соединения. Разница была ничтожная — тысячные доли грамма, но она была.

Релей написал об этом письмо в лондонский журнал «Природа». В письме он спрашивал, не сумеет ли кто-либо из читателей журнала объяснить, почему «воздушный» азот тяжелее. Но ответов не последовало. Тогда Релей обратился за помощью к своему другу — известному химику Рамзаю, и они решили, что каждый из них не покинет своей лаборатории до тех пор, пока загадка не будет разгадана. Они работали разными методами и, наконец, нашли,



Этот листочек найден в архиве Менделеева. На нем ясно видны указания на недостающие элементы будущей нулевой группы. Более чем за двадцать лет до открытия благородных газов великий ученый уже предугадывал их существование.

что в обычном воздухе имеется какая-то примесь — и не малая: в каждом литре воздуха содержится около десяти кубических сантиметров нового, неизвестного газа. Они дали ему имя «аргон». Странный это был газ. Подобных веществ химики еще не знали. Никакими средствами нельзя было заставить его вступать в химические реакции. Он не соединялся ни с чем. Это и было выражено в его названии: в переводе с греческого «аргон» значит «ленивый».

Аргон оказался новым химическим элементом. Затем Рамзай узнал, что известный геолог Гильдебрант наблюдал некоторые минералы, содержащие уран или торий, которые при нагревании выделяют какой-то негорючий газ. Рамзай решил проверить, не аргон ли это.

Но газ, выделившийся из минерала клевеита, оказался не аргоном. У него был совершенно другой спектр, отличный от уже изученного спектра аргона. Рамзай дал ему имя «криптон» («тайный») и послал запаянную пробирку с криптоном одному из опытных спектроскопистов — Круксу для точного исследования спектра.

В ответ он получил телеграмму: «Криптон — это гелий. Приходите и поглядите. Крукс».

Таким образом газ, впервые за четверть века до этого найденный на Солнце, был, наконец, обнаружен на Земле. Гелий оказался самым легким газом после водорода.

Но периодический закон не предусматривал существования таких химических элементов, как гелий и аргон. Для них в периодической системе не было пустых клеток. Куда поместить новые элементы?

Скептики снова воспряли духом, снова зазвучали голоса сомневающихся в периодической системе и периодическом законе. Но это продолжалось недолго.

В 1897 г. Рамзай прочел доклад, который он озаглавил так: «Еще не открытый газ». Рамзай сказал: «По образцу нашего учителя Менделеева я описал, поскольку возможно было, ожидаемые и предполагаемые соотношения газообразного элемента, который должен был бы заполнить пробел между гелием и аргоном».

Места для гелия и аргона в менделеевской таблице нашел Рамзай. Они были помещены в новый, нулевой, столбец между седьмым, где были фтор и хлор, и первым, где разместились металлы, подобные литию и калию.

Отсюда следовало, что должен существовать газ, столь же инертный, как аргон, но легче его, с атомным весом 20.

Руководствуясь предсказанными свойствами, Рамзай предпринял поиски нового газа и нашел его в жидком воздухе. Этот газ получил название «неон», что значит «новый», а вскоре были найдены и остальные элементы новой группы: криптон, ксенон и затем радон.

Так через тридцать лет оправдалась мимолетная догадка гениального ученого, которой он сам в свое время не придал значения. Единственным свидетельством этой изумительной прозорливости Менделеева осталась его записка с вопросительными знаками.

Из нового испытания периодический закон вышел с победой. Иначе и не могло быть!

После этого ни у кого в мире не оставалось сомнения в истинности периодического закона Менделеева.

Этот успех был заслуженным. Великий закон доказал единство вещества во Вселенной. Он внес стройность и порядок в невообразимую путаницу бесчисленного множества фактов, наблюдений, результатов измерений, накопленных химией за сотни лет к середине прошлого века. Он дал могучий метод для изучения химических элементов и их свойств. Самим Менделеевым были исправлены атомные веса многих элементов, известных ранее, в том числе, например, урана. Периодический закон дал возможность предсказывать новое — это истинный закон природы.

Но не все было ясно в периодическом законе во времена Менделеева. Были необъяснимые исключения: атомный вес аргона (39,9) оказался больше, чем атомный вес калия (39,1), а аргон в таблице стоит перед калием. И у теллура, стоящего перед йодом, атомный вес оказался больше, чем у йода.

Сам Менделеев не поколебался допустить эти исключения в таблице. Отсюда следует, что не атомный вес определяет положение элемента в таблице. Но тогда что же? Очевидно, совокупность всех химических свойств. А отчего зависят химические свойства?

Не только это было неясно в таблице. Было твердо установлено, сколько должно было быть элементов в первых периодах таблицы, но совершенно было неясно, сколько элементов должно быть в ее последних периодах.

Самое же главное, что было неясно,— это сам периодический закон. Он требовал от науки решения величайшей, казалось неразрешимой, задачи — объяснить периодичность химических свойств элементов, из которых состоит весь окружающий нас мир.

КАК РАДИОАКТИВНЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ НАШЛИ СВОИ МЕСТА В ТАБЛИЦЕ МЕНДЕЛЕЕВА

Развитие науки поставило периодический закон перед новым, еще более суровым испытанием, чем те, из которых он уже с честью вышел. Это было в начале нашего века.

Элементы, предсказанные Менделеевым, уже были найдены. Новая группа благородных газов, обнаруженная сначала на Солнце, а затем и на Земле, уже нашла свое место в таблице. Казалось, все было закончено и все ясно.

Но вот во Франции два скромных ученых, супруги Пьер и Мария Кюри, заинтересовались странным явлением, открытым другим ученым — Беккерелем. Они решили выяснить, почему минералы и руды, содержащие уран, испускают загадочные невидимые лучи, способные проникать через непрозрачные тела и действовать на фотографическую пластинку. Очень скоро они обнаружили, что в природе существуют такие минералы, в которых урана мало, а на пластинку эти минералы действуют гораздо сильнее, чем чистый уран. Супруги Кюри предприняли огромную, занявшую долгие годы их жизни работу по поискам новых неведомых элементов — носителей радиоактивного излучения.

Первым был открыт полоний, вслед за ним — радий. Это были новые элементы, таких наука еще не знала. Их радиоактивность была в тысячи раз сильнее, чем у урана. Чудесные свойства резко отличали их от всех известных ранее элементов.

Даже легкое прикосновение к ним причиняет тяжелые ожоги. Алмаз, поднесенный к радию, начинает ярко светиться голубым сиянием. Еще ярче светится сернистый цинк. Заряженные тела немедленно теряют свои электрические заряды, когда к ним приближают радий. Но самое главное — новые элементы выделяют самопроизвольно огромные количества энергии. Радий сам по себе без всякого воздействия всегда остается нагретым. Каждый час один грамм радия выделяет 136 калорий тепла.

Эти таинственные свойства поразили ученых. Но тогда никто не подозревал, что это было только начало, начало новой эры человечества — атомного века.

Довольно быстро, как только были изучены химические свойства новых элементов, они нашли свои места в периодической системе. Оказалось, что оба элемента — и полоний, и

радий — также когда-то были предсказаны Менделеевым. Радий — это был экабарий, он занял 88-ю клетку в периодической системе, полоний — 84-ю. Его Менделеев называл двителлуром. Значит, место для них было, и казалось, что все благополучно. Но, когда были изучены подробно свойства новых радиоактивных элементов, обнаружились совершенно неожиданные для науки явления.

Самым важным было то, что с открытием радиоактивных элементов рухнули привычные и, казалось, незыблемые представления о вечности и неизменности каждого элемента. Новые элементы были непостоянны, они рождались и исчезали, превращаясь в другие элементы. Одни из них исчезали в течение миллионных долей секунды, другие жили тысячи лет. Их свойство испускать невидимые лучи свидетельствовало о распаде их атомов.

А когда были изучены подробнее все три сорта лучей, испускаемых радиоактивными элементами, оказалось, что одни из них представляют собой поток ядер атомов гелия, несущих на себе по два положительных заряда,— это альфа-лучи, другие — поток отрицательно заряженных электронов — бета-лучи и, наконец, третьи — гамма-лучи — сходны со светом, но обладают гораздо более короткой длиной волны.

Целая армия физиков и химиков во всем мире включилась в «охоту» за новыми радиоактивными элементами. И вскоре их было найдено так много, что у ученых иссякла фантазия и пропала охота давать им новые самостоятельные имена. Их стали обозначать просто по именам их «предков» с прибавлением различных букв.

Скоро было найдено, что радий — далекий потомок урана. Сам радий превращается в радиоактивный газ радон. И при каждом превращении радиоактивный атом обязательно испускает либо заряженные ядра атомов гелия (α-частицы), либо электроны (β-частицы).

Вот сколько потомков оказалось в ряде распада урана (см. рис. на этой странице. Рядом со стрелочкой помечено, какую частицу — α или β — выбрасывает атом при распаде).

Не меньше потомков было найдено и у элемента тория, который также оказался радиоактивным. И почти столько же в ряде актиния. Вскоре физики нашли более сорока новых радиоактивных элементов.

И перед наукой снова встал трудный и принципиально важный вопрос: где и как найти места в периодической системе для всех этих новых многочисленных элементов? Их было гораздо больше, чем оставалось свободных клеток в таблице.

Ряд распада урана.

Эту задачу науке пришлось решать уже без помощи и без участия Менделеева. Ему не пришлось дожить до последнего, самого трудного испытания его великой идеи.

Химики занялись определением химических свойств новых радиоактивных элементов. Это была трудная задача. Ведь среди них были такие, которые «жили» ничтожные доли секунды.

Разгадка была найдена, когда радиоактивные элементы были настолько хорошо изучены, что стало возможным сопоставить природу лучей, испускаемых элементом, с его химической природой и с природой того нового элемента, который из него образуется при радиоактивном превращении. Разгадка была найдена опять-таки с помощью периодической системы Менделеева.

Изучая свойства урана X_1— ближайшего потомка урана, его «сына», химики скоро убедились, что по своим химическим свойствам он неотличим от давно известного тория. Но все же это не был знакомый химикам торий. Торий — обычный элемент, его радиоактивность так слаба, что ее трудно обнаружить. А уран X_1 сильно радиоактивен, быстро распадается, через 24 дня от него остается только половина того количества, которое было раньше.

В общем, это новый элемент. Но все же химически — это торий. Если уран X_1 смешать с торием, никакими химическими реакциями их разделить невозможно.

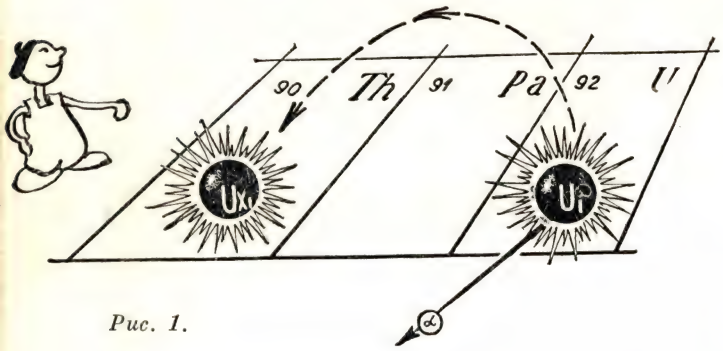


Рис. 1.

Уран превращается в UX_1, испуская α-лучи. На каждый распавшийся атом урана из его ядра вылетает α-частица и уносит два положительных заряда. Уран занимает 92-е место в таблице, в седьмом периоде. А где должен быть его первый потомок, UX_1? Торий Менделеев поместил в 90-ю клетку своей системы. А UX_1 неотличим от тория. После долгих и трудных поисков и колебаний пришлось признать, что место для UX_1 — в клетке, где находится торий; α-частица уносит из ядра атома два положительных заряда, и при этом образуется новый атом, занимающий в периодической таблице место с номером, на две единицы меньшим (рис. 1).

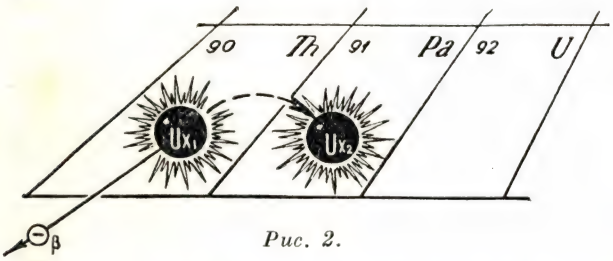


Рис. 2.

Проследим теперь, что происходит с UX_1 дальше при его распаде. Он испытывает β-превращение, образуя новое радиоактивное вещество, которое было обозначено UX_2, еще быстрее исчезающее. Оказалось, что по химическим свойствам UX_2 должен быть помещен в 91-ю клетку (рис. 2).

Но потеря одного отрицательного заряда ядром атома равноценна приобретению одного положительного заряда. В результате получилось, что при увеличении положительного заряда ядра элемента на единицу образуется новый элемент, занимающий в периодической системе клетку, номер которой на единицу больше. В свою очередь UX_2 снова теряет β-частицу и превращается в уран II, который совершенно неотличим от своего «прадеда» — обычного урана и должен быть помещен в одной клетке с ним, т. е. занять 92-е место в таблице. И всегда увеличение положительного заряда ядра на единицу (потеря одного отрицательного электрона) приводит к такому изменению химических свойств, которое соответствует увеличению порядкового номера элемента на единицу.

Изучая радиоактивные элементы, химики столкнулись с новым, совершенно потрясающим фактом. Посмотрите сами, что получилось. Атомный вес урана — 238. Каждый атом его на пути радиоактивного превращения до урана II теряет последовательно одну α-частицу (т. е. ядра атомов гелия, атомный вес которого четыре) и две β-частицы (это легкие, с ничтожной массой электроны). В результате заряд ядра атома радиоактивного урана II оказался таким же, как у обычного урана. И по своим химическим свойствам он неотличим от обычного урана (рис. 3).

Но атомный вес становится, конечно, совершенно другим. Каждая вылетающая α-частица

Таблица 35. До Менделеева ничего не было известно об элементах, занимающих теперь в периодической таблице порядковые номера 2, 10, 18, 21, 31, 32, 36, 43, 54, 60, 61, 62, 63, 64, 65, 66, 67, 69, 70, 71, 72, 75, 84, 85, 86, 87, 88, 89, 91, 93, 94, 95, 96, 97, 98, 99, 100, 101. Одни из них не были еще открыты, другие не существовали вовсе. Кроме того, у многих из известных в то время элементов были неверно определены их атомные веса. Достаточно хорошо были изучены только 54 элемента (они обозначены на таблице зеленым цветом). Менделеев предсказал существование двенадцати новых элементов. Для трех из них он предсказал заранее все важнейшие физические и химические свойства не только самих элементов, но и некоторых их соединений. Это были элементы 21, 31 и 32 (их клетки окрашены в желтый цвет). Кроме этих элементов, им были предсказаны: 43, 72, 75, 84, 85, 87, 88, 89, 91 (сиреневые клетки). Не делая никаких измерений, он исправил неверные атомные веса и предсказал их точное значение для элементов 4, 39, 49, 57, 58, 59, 68, 90, 92 (голубой цвет). Таким образом, по существу им был предсказан 21 элемент. По примеру Менделеева, на основании его закона были предсказаны элементы 10, 36, 54, 86 (они отмечены синей краской). После установления периодического закона были открыты элементы 2, 18, 60, 62, 63, 64, 65, 66, 67, 69, 70, 71 (розовый цвет). Элементы 43, 61, 85 не были найдены в природе. Они были созданы человеком. Элементы 93, 94, 95, 96, 97, 98, 99, 100, 101 лежат за пределами таблицы времен Менделеева; их также не было на Земле, все они созданы искусственно, и пути к их синтезу указаны периодическим законом Менделеева (искусственно полученные элементы помечены на таблице светло-сиреневым цветом). Элементы 43, 85, 87 помечены на таблице двумя цветами — розовым и сиреневым. Это искусственно полученные элементы, которые были предсказаны Д. И. Менделеевым.

ПЕРИОДИЧЕСК

ПЕРИОДЫ	РЯДЫ	Г		
		I	II	III
1	I	H 1 ВОДОРОД 1.0080		
2	II	Li 3 ЛИТИЙ 6.940	Be 4 БЕРИЛЛИЙ 9.013	5 B БОР 10.82
3	III	Na 11 НАТРИЙ 22.997	Mg 12 МАГНИЙ 24.32	13 Al АЛЮМИНИЙ 26.98
4	IV	K 19 КАЛИЙ 39.100	Ca 20 КАЛЬЦИЙ 40.08	Sc 21 СКАНДИЙ 44.96
	V	29 Cu МЕДЬ 63.54	30 Zn ЦИНК 65.38	31 Ga ГАЛЛИЙ 69.72
5	VI	Rb 37 РУБИДИЙ 85.48	Sr 38 СТРОНЦИЙ 87.63	Y 39 ИТТРИЙ 88.92
	VII	47 Ag СЕРЕБРО 107.880	48 Cd КАДМИЙ 112.41	49 In ИНДИЙ 114.76
6	VIII	Cs 55 ЦЕЗИЙ 132.91	Ba 56 БАРИЙ 137.36	La 57 * ЛАНТАН 138.92
	IX	79 Au ЗОЛОТО 197.0	80 Hg РТУТЬ 200.61	81 Tl ТАЛЛИЙ 204.39
7	X	Fr 87 ФРАНЦИЙ (223)	Ra 88 РАДИЙ 226.05	Ac 89 ** АКТИНИЙ 227

* Л				
Ce 58 ЦЕРИЙ 140.13	Pr 59 ПРАЗЕОДИМ 140.92	Nd 60 НЕОДИМ 144.27	Pm 61 ПРОМЕТИЙ (145)	Sm САМ 150.

* *			
Th 90 ТОРИЙ 232.05	Pa 91 ПРОТАКТИНИЙ (231)	U 92 УРАН 238.07	Np 93 НЕПТУНИЙ (237)

РИОДИЧЕСКАЯ СИСТЕМА ЭЛЕМЕНТОВ Д. И. МЕНДЕ

ГРУППЫ ЭЛЕМЕНТОВ

II	III	IV	V	VI	VII	VIII
					(H)	
4 ИЛЛИЙ 3	5 B БОР 10.82	6 C УГЛЕРОД 12.011	7 N АЗОТ 14.008	8 O КИСЛОРОД 16	9 F ФТОР 19.00	
12 ГНИЙ 32	13 Al АЛЮМИНИЙ 26.98	14 Si КРЕМНИЙ 28.06	15 P ФОСФОР 30.975	16 S СЕРА 32.066	17 Cl ХЛОР 35.457	
20 ЬЦИЙ 08	Sc 21 СКАНДИЙ 44.96	Ti 22 ТИТАН 47.90	V 23 ВАНАДИЙ 50.95	Cr 24 ХРОМ 52.01	Mn 25 МАРГАНЕЦ 54.94	Fe 26 ЖЕЛЕЗО 55.85 / Co КОБ 58.9
30 Zn ИНК 65.38	31 Ga ГАЛЛИЙ 69.72	32 Ge ГЕРМАНИЙ 72.60	33 As МЫШЬЯК 74.91	34 Se СЕЛЕН 78.96	35 Br БРОМ 79.916	
38 ОНЦИЙ 63	Y 39 ИТТРИЙ 88.92	Zr 40 ЦИРКОНИЙ 91.22	Nb 41 НИОБИЙ 92.91	Mo 42 МОЛИБДЕН 95.95	Tc 43 ТЕХНЕЦИЙ (99)	Ru 44 РУТЕНИЙ 101.1 / Rh РОД 102.9
48 Cd ДМИЙ 112.41	49 In ИНДИЙ 114.76	50 Sn ОЛОВО 118.70	51 Sb СУРЬМА 121.76	52 Te ТЕЛЛУР 127.61	53 J ИОД 126.91	
56 РИЙ 36	La 57 * ЛАНТАН 138.92	Hf 72 ГАФНИЙ 178.60	Ta 73 ТАНТАЛ 180.95	W 74 ВОЛЬФРАМ 183.92	Re 75 РЕНИЙ 186.31	Os 76 ОСМИЙ 190.2 / Ir ИРИ 192.2
80 Hg ТУТЬ 200.61	81 Tl ТАЛЛИЙ 204.39	82 Pb СВИНЕЦ 207.21	83 Bi ВИСМУТ 209.00	84 Po ПОЛОНИЙ (210)	85 At АСТАТИН (210)	
88 ДИЙ 05	Ac 89 ** АКТИНИЙ 227	(Th)	(Pa)	(U)		

*ЛАНТАНОИДЫ 58 – 71

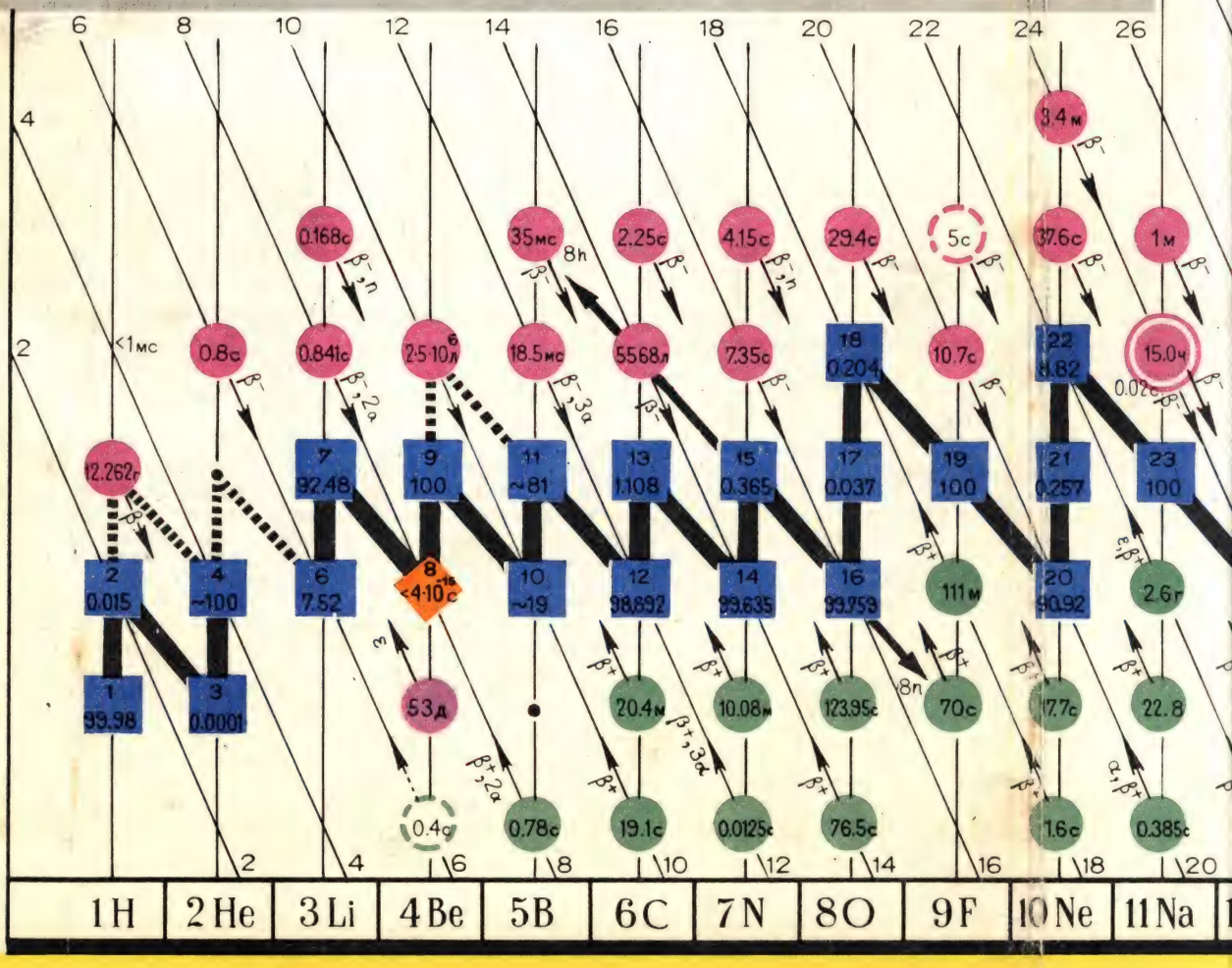
60 ИМ 7	Pm 61 ПРОМЕТИЙ (145)	Sm 62 САМАРИЙ 150.43	Eu 63 ЕВРОПИЙ 152.0	Gd 64 ГАДОЛИНИЙ 156.9	Tb 65 ТЕРБИЙ 158.93	Dy 66 ДИСПРОЗИЙ 162.46	Ho 67 ГОЛЬМИЙ 164.94	Er 68 ЭРБИЙ 167.27	T 16

**АКТИНОИДЫ 90 – 101

U 92 УРАН 238.07	Np 93 НЕПТУНИЙ (237)	Pu 94 ПЛУТОНИЙ (242)	Am 95 АМЕРИЦИЙ (243)	Cm 96 КЮРИЙ (245)	Bk 97 БЕРКЛИЙ (247)	Cf 98 КАЛИФОРНИЙ (249)	En 9 ЭЙНШТЕЙ (253)

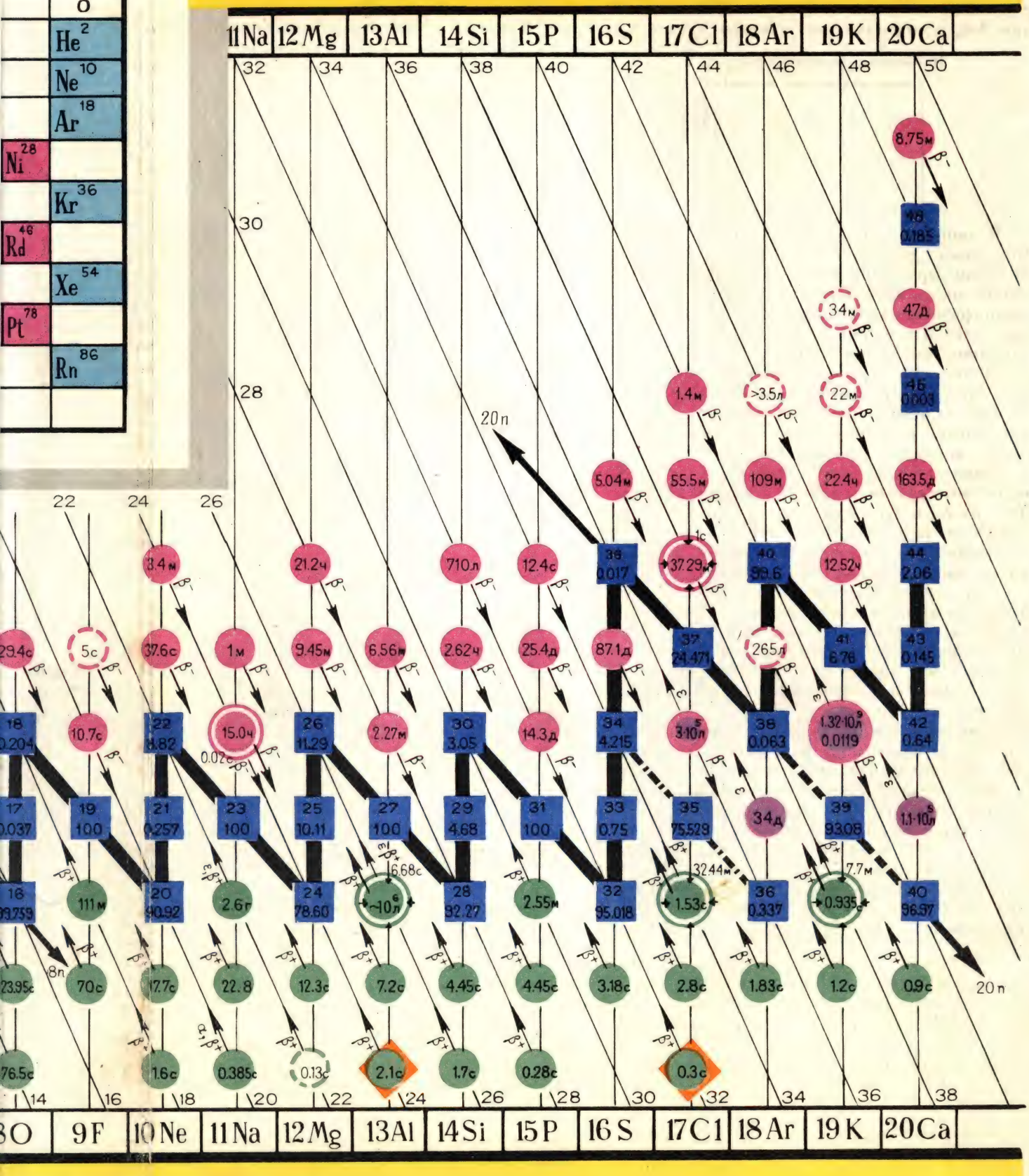
ПЕРИОДИЧЕСКИЙ ЗАКОН ХИМИИ ЗЕМНОЙ КОРЫ

ПЕРИОДЫ	РЯДЫ	ГРУППЫ ЭЛЕМЕНТОВ I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII			O
1	I	H 1						(H)				He 2
2	II	Li 3	Be 4	B 5	C 6	N 7	O 8	F 9				Ne 10
3	III	Na 11	Mg 12	Al 13	Si 14	P 15	S 16	Cl 17				Ar 18
4	IV	K 19	Ca 20	Sc 21	Ti 22	V 23	Cr 24	Mn 25	Fe 26	Co 27	Ni 28	
	V	Cu 29	Zn 30	Ga 31	Ge 32	As 33	Se 34	Br 35				Kr 36
5	VI	Rb 37	Sr 38	Y 39	Zr 40	Nb 41	Mo 42	Tc 43	Ru 44	Rh 45	Rd 46	
	VII	Ag 47	Cd 48	In 49	Sn 50	Sb 51	Te 52	J 53				Xe 54
6	VIII	Cs 55	Ba 56	La* 57	Hf 72	Ta 73	W 74	Re 75	Os 76	Ir 77	Pt 78	
	IX	Au 79	Hg 80	Tl 81	Pb 82	Bi 83	Po 84	At 85				Rn 86
7	X	Fr 87	Ra 88	Ac** 89	(Th)	(P)	(U)					



КОРЫ

НАЧАЛО ПЕРИОДИЧЕСКОЙ ТАБЛИЦЫ АТОМНЫХ ЯДЕР



уменьшает атомный вес на четыре единицы, а при β-превращениях он остается постоянным.

Изменение атомного веса урана

UI — α — β — β = UII
238 — 4 — 0 — 0 = 234

В одной и той же клетке, где, как считал Менделеев, должен быть только один элемент со своим, присущим только ему атомным весом, теперь оказались два разных вещества, с разными физическими признаками и, самое главное, хотя и с разными атомными весами, но с одинаковыми химическими свойствами. Оказалось, что один и тот же элемент может обладать различным атомным весом.

Но этого мало. Был получен еще более удивительный результат: при β-распаде атомный вес не меняется, а химическая природа элемента меняется очень резко. Уран X_1 — это по химическим свойствам торий, а уран X_2 занимает 91-е место и по химическим свойствам неотличим от уже известного ранее элемента протактиния (Pa); следовательно, разные элементы могут иметь одинаковый атомный вес.

Что же в конце концов получилось? В качестве основного признака элемента Менделеевым был принят атомный вес. Но конечным продуктом в ряде радиоактивного распада урана является радий D, его атомный вес 206. Этот элемент уже неактивен, а химически неотличим от свинца.

При распаде тория в конце концов образуется тоже неактивный торий D, его атомный вес 208. По химическим свойствам это тоже свинец.

Ряд распада актиния обрывается на неактивном продукте — актинии D, его атомный вес 207, а химически он — опять-таки свинец.

Но мало этого, в этих рядах есть еще радиоактивные промежуточные продукты распада: радий B с атомным весом 214, радий B с атомным весом 210, торий B — атомный вес 212 и актиний D — 211.

И все эти радиоактивные элементы, все до одного абсолютно сходны со свинцом, и все они обладают разным атомным весом.

Но ведь в каждой клетке может быть только один элемент с его собственным атомным весом! В клетке № 82 может быть свинец с атомным весом 207,18. Изучая радиоактивные элементы, ученые нашли еще семь веществ с атомным весом 214, 212, 211, 210, 208, 207, 206 и химическими свойствами свинца.

Наука оказалась в очень большом затруднении. Как же их разместить в периодической таблице? Их нельзя считать разными элементами — это все свинцы, но считать одним элементом, одной разновидностью атомов тоже нельзя — у них разные атомные веса.

В конце концов стало ясно, что все они должны занимать одно место в таблице Менделеева. Их так и называют «изотопы» (от греческих слов: «равный» и «место»).

Это испытание для периодического закона было очень тяжелым. Полученные при изучении радиоактивных элементов результаты, с которыми мы только что коротко познакомились, поставили под сомнение основу периодической системы. Стало совершенно ясно, что атомный вес не может служить величиной, которая определяет химические свойства элемента. И наука снова встала перед большой задачей.

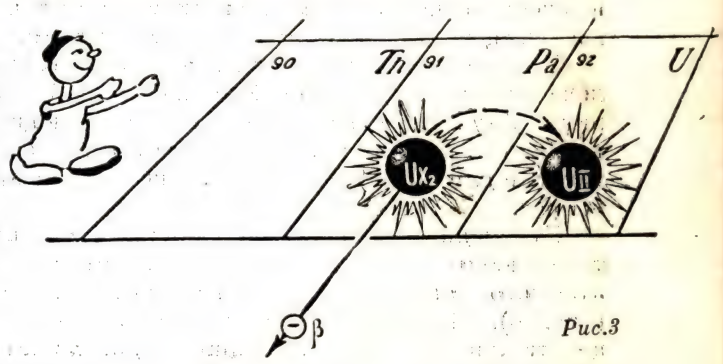


Рис.3

ЧТО ЯВЛЯЕТСЯ ОСНОВОЙ ВЕЛИКОГО ЗАКОНА

Периодический закон — великий закон природы, открытый Менделеевым, остается незыб-

Таблица 36. Начало периодической таблицы атомных ядер от водорода до кальция. На этом участке находятся три первых периода ядерной структуры, определяющиеся магическими цифрами 2, 8, 20. В левом верхнем углу приведена таблица, показывающая связь между положением элемента в периодической системе Менделеева и его геохимическими свойствами. Голубой краской указаны элементы, встречающиеся преимущественно в атмосфере, розовой краской — элементы, встречающиеся в самородном состоянии, зеленой — образующие рудные месторождения; серым цветом обозначены элементы, входящие преимущественно в состав силикатных пород; оранжевым и сиреневым — искусственные и радиоактивные элементы.

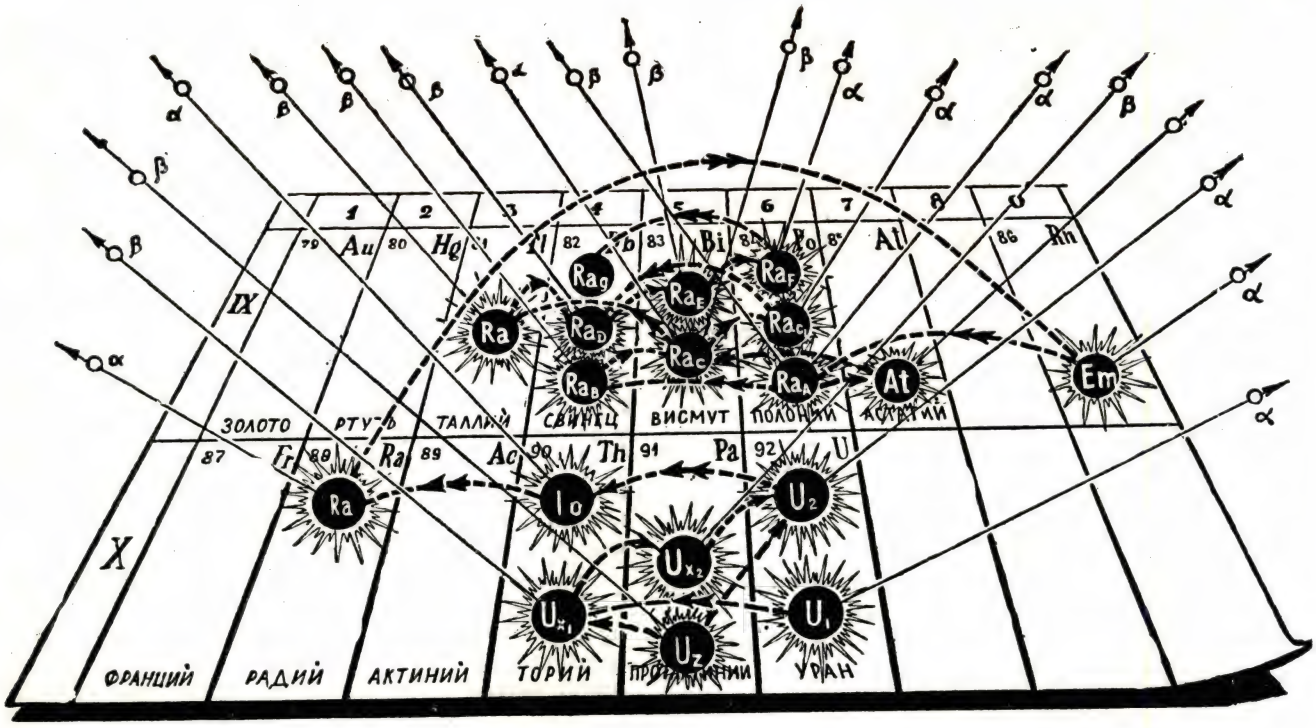


Рис. 4.

лемым. Но атомный вес, принятый Менделеевым в качестве основной характеристики химического элемента, не выдержал тяжелого испытания.

Что же заменило атомный вес? Как расположены элементы в новой менделеевской таблице? Изучение радиоактивных элементов дало возможность найти ответ на этот большой и важный для познания окружающего нас мира вопрос.

Проследите внимательно на рисунке за путешествием распадающегося радиоактивного атомного ядра по периодической системе (рис. 4). По дороге атом урана побывает в десяти клетках двух последних рядов таблицы Менделеева, пока не превратится в устойчивый атом свинца. Он испытает четырнадцать последовательных превращений, образуя восемнадцать изотопов десяти различных элементов. Одни из этих изотопов живут миллиарды лет (уран I), другие — сотни тысяч лет (уран II), есть среди них исчезающие за тысячные доли секунды (радий C_1), и только свинец (радий D) — вечный.

При каждом превращении атом, выбрасывающий α-частицу, сдвигается по таблице влево в клетку с номером, меньшим на две единицы, а атом, испытывающий β-превращение,— на одну клетку вправо. Атомы Ra A и Ra C могут распадаться сразу по двум направлениям.

При этом атом урана теряет десять положительных зарядов:

$$8\times(+2)+6\times(-1)=10.$$

Заметьте, что при этом с элементом происходят такие глубокие изменения его химической природы, которые соответствуют перемещению элемента из 92-й клетки — места урана — в 82-ю, где находится свинец. И десяти потерянным положительным зарядам соответствуют десять номеров в периодической системе.

Химия радиоактивных элементов заставила предположить, что в основе периодического закона должен лежать другой фундамент — не атомный вес, а положительный заряд атомного ядра.

Но окончательно периодическую закономерность объяснила физика. Она вскрыла загадочную тайну чередования элементов со сходными химическими свойствами. Физика разъяснила бездеятельность элементов группы инертных газов, правильную последовательность возрастания валентности.

Стали ясны и исключения в таблице. Но никогда не удалось бы этого достигнуть, если бы

в руках исследователей, ученых, вскрывавших глубочайшие тайны природы, не было могучего путеводного маяка — периодического закона. Без него мы не узнали бы, как устроен атом, не проникли бы внутрь атома, что привело к овладению его энергией, не знали бы природу сил, связывающих атомы различных элементов между собой. Мы не могли бы расшифровывать строение сложнейших химических соединений, не смогли бы создавать новые вещества с нужными нам свойствами.

Если бы Менделеев не открыл периодический закон, он все равно был бы открыт. Но кто может сказать, на сколько лет задержалось бы развитие науки?

По существу наш рассказ о создании периодической системы элементов закончен. Но далеко не закончена история развития периодического закона.

В наши дни таблица химических элементов совсем не такая, какой ее когда-то создал Менделеев. Место атомного веса в ней занял атомный номер, равный величине положительного заряда атомного ядра.

Величина атомного номера позволила твердо установить, сколько элементов должно быть в каждом периоде. Мы знаем, что вместе с ураном, наиболее тяжелым из элементов, существовавших на Земле до наших дней и до того времени, как человек сам научился создавать новые элементы, было всего 92 элемента, не больше и не меньше.

Правда, мы еще точно не знаем, сколько новых элементов может быть создано человеком, сколько и какие элементы тяжелее урана существуют в недрах далеких звезд, где идут пока еще неведомые ядерные процессы и рождаются атомы.

Атомный номер элемента, равный единице у водорода — первого элемента периодической системы, пяти — у пятого по порядку бериллия, двадцати шести — у железа, которое стоит на двадцать шестом месте, физики определили не путем изучения химических свойств элемента, а изучая чисто физические свойства вещества.

Молодой физик Мозли, погибший в первой мировой войне, изучая рентгеновские спектры элементов, нашел, что длина волны рентгеновского излучения элемента в рентгеновской трубке зависит от места, которое занимает этот элемент в таблице Менделеева. Можно, зная рентгеновский спектр неизвестного элемента, определить, где он должен стоять в периодической системе, определить его атомный номер.

Этот метод оказался абсолютным: из него не было исключения. Аргон, как вы помните, тяжелее калия по атомному весу. Это было загадочным исключением в таблице Менделеева. Исследование рентгеновских спектров показало, что атомный номер аргона равен 18, номер калия 19 — в точности, как они размещены в таблице.

Появился новый чисто физический признак элемента — его атомный номер, вычисляемый по измерению длины волны рентгеновского излучения элемента.

Атомный номер быстро нашел свое объяснение. Изучение радиоактивности вместе с изучением рентгеновских спектров привело к разгадке тайны атомного номера.

Оказалось, что атом каждого элемента имеет тяжелое центральное ядро, в котором сосредоточена почти вся масса атома и атомный номер равен числу положительных зарядов ядра.

Разгадка периодической закономерности была найдена, когда была разгадана сложнейшая природа строения внешней электронной оболочки атомов, законов движения электронов вокруг ядра.

Десятки, сотни и тысячи ученых во всем мире трудились над разгадкой тайны строения атома. Теоретики, создавая новые модели атома, руководствовались периодическим законом. Экспериментаторы, как физики, так и химики, отыскивая новые закономерности, открывая новые факты, всегда сопоставляли свои результаты с системой Менделеева.

Естественная, как ее назвал Менделеев, система элементов не только требовала объяснения загадочной тайны периодичности, но она же и руководила наукой в поисках разгадки этой тайны.

ПЕРИОДИЧЕСКИЙ ЗАКОН — ЗАКОН СТРОЕНИЯ АТОМА

Долгим и трудным путем шла наука к разгадке великой тайны периодического закона. Он воплотил в себе все необозримое многообразие бесконечного множества химических процессов и превращений в окружающем нас мире. Он внес стройность и порядок в химию, где царствовал хаос отрывочных и несвязанных сведений, фактов, наблюдений, накопленных многими поколениями химиков.

Но почему же существует таинственная правильная повторяемость свойств химических элементов? Почему натрий похож на литий, а хлор

сходен с фтором? Почему существуют бездеятельные «ленивые» газы? Почему кислород и сера, стоящие в шестой группе таблицы, соединяются каждый с двумя атомами водорода, а атомы углерода и кремния, находящиеся оба в четвертой группе, образуют с водородом соединения, содержащие по четыре водородных атома? Почему элементы так послушно повинуются периодическому закону? Много можно задать подобных вопросов.

На все эти вопросы наука в наши дни уже нашла ответ.

Теперь мы знаем, что тайна периодического закона, таинственная причина всех закономерностей, управляющих течением всех химических реакций между всеми химическими элементами, дающими бесчисленное множество соединений, из которых состоят все тела в окружающем нас чудесном бесконечном мире, перестала быть тайной. Она теперь вскрыта в разгаданных наукой законах движения электронов в атомах, в законе строения, как мы его теперь называем, электронных оболочек атома. Мы знаем уже, что атом каждого элемента имеет ядро. Вокруг ядра движутся электроны. Движутся по строгим законам, на определенных расстояниях, движутся с неимоверными, чудовищными скоростями, так что наука сегодняшнего дня еще не может уследить за каждым из них, и они как бы сливаются для нас в сплошные электронные оболочки.

Если бы мы могли рассмотреть атом, то, вероятнее всего, он показался бы нам похожим на пульсирующее, меняющее свою форму и размеры облачко.

Но даже по сравнению с ничтожными размерами этого электронного облачка-атома исчезающе мала величина атомного ядра, находящегося в центре атома.

Если бы мы захотели показать на рисунке схему строения атома и ядро обозначить точкой, величиной в один миллиметр, то в эту книгу пришлось бы вклеить страницу размером больше Красной площади в Москве, иначе изображение атома не смогло бы поместиться. Страница была бы пустой, и лишь точка в центре ее изобразила бы атомное ядро, а где-то у краев этой гигантской страницы проходили бы орбиты, по которым должны двигаться самые внешние электроны. Размеры атома в сотни тысяч раз больше размеров его ядра.

И орбиты электронов в атоме мы умеем теперь точно рассчитывать. Мы знаем, насколько прочно связаны электроны с ядром и сколько энергии нужно затратить, чтобы оторвать каждый из них от ядра. А именно от этого и зависят все химические свойства атома, этим определяются те силы, что связывают атомы в сложные химические молекулы веществ, образующих все вокруг нас, а также и наше тело.

Еще не так давно даже сам создатель периодической таблицы Менделеев считал атомы вообще непознаваемыми. А в наши дни ученые спорят о тонких деталях строения атомов, созданных самим человеком.

Теперь мы твердо знаем, что у самого легкого газа — водорода в каждом атоме один электрон. Лучше всего мы знаем законы движения электрона вокруг ядра водорода. Эти законы определяют и спектр водорода — те световые волны, которые испускаются атомами водорода и в пламени заводской топки, где сгорает содержащая водород нефть, и на Солнце, где бушуют чудовищные вихри раскаленного водорода. И этот свой единственный электрон атом водорода может сравнительно легко терять.

У второго элемента — гелия — два электрона, и оба они очень прочно связаны с ядром, так что выбить их из атома очень трудно.

У всех элементов два первых, наиболее близких к ядру электрона одинаково прочно связаны с ядром. Они образуют первую электронную оболочку, состоящую всего из двух электронов.

У элемента лития, занимающего третье место в таблице Менделеева, два первых электрона также прочно связаны с ядром, а третий значительно слабее. Этот электрон попадает во вторую, внешнюю, электронную оболочку.

У четвертого — бериллия — во внешней оболочке два электрона, у пятого — бора — три, у шестого — углерода — четыре, у азота — пять, у кислорода — шесть, у фтора — семь электронов во внешней оболочке.

А у десятого элемента — неона, благородного газа, во внешней оболочке восемь электронов. Все они прочно связаны с ядром, как и электроны атома благородного газа гелия. Оторвать их почти невозможно, и больше электронов во внешней электронной оболочке атома быть не может. Следующий электрон у элемента, ядро которого имеет 11 положительных зарядов, — у металла натрия — может поместиться только на новой электронной оболочке атома, отстоящей от ядра значительно дальше.

А затем все повторяется снова: у двенадцатого элемента — магния — во внешней оболочке два электрона, у тринадцатого — алюминия — три, у четырнадцатого — кремния — четыре, у фосфора — пять, у серы — шесть, у хлора — семь,

Но магний похож на бериллий, алюминий сходен в своих химических свойствах с бором, кремний — с углеродом, хлор — со фтором.

У сходных по свойствам элементов внешние электронные оболочки построены одинаково.

На цветной таблице (стр. 600) изображено начало периодической таблицы — два ее первых периода. Но в соответствующих клетках таблицы рядом с химическим символом и атомным номером помещены схемы строения атомов — их электронных оболочек.

Последующие длинные периоды периодической таблицы очень трудно изобразить на рисунке. У элементов в клетках этих периодов по 18 и по 32 электрона во внутренних оболочках. Их не изобразишь в такой табличке. Ограничимся поэтому только одним примером.

ПОЧЕМУ В ОДНОМ СТОЛБЦЕ СТОЯТ РЯДОМ ЖЕЛЕЗО, КОБАЛЬТ, НИКЕЛЬ

В середине четвертого длинного периода менделеевской таблицы находятся три элемента, занимающие рядом 26-е, 27-е и 28-е места. Это очень сходные друг с другом элементы. Они даже расположены вместе, в одном столбце, образуя триаду — железо, кобальт и никель. Даже их названия ведут свое происхождение от их большого сходства: когда-то в средние века рудокопы иногда находили загадочные руды, похожие на железные, из которых никак не удавалось выплавить железо. Они считали, что над ними подшучивают горные духи, карлики кобольды и старый черт Ник. Отсюда и название металлов: кобальт и никель.

Эти три металла и в технике наших дней всегда вместе. Самые лучшие, самые твердые стали образуют сплавы железа с никелем и кобальтом. И химически они ведут себя похоже, давая соединения одинакового состава.

А происходит это потому, что у них одинаково построены наружные электронные оболочки. У каждого во внешней, валентной, оболочке по два электрона. Но зато у них происходит, как химики говорят, достраивание предыдущей, более глубокой оболочки, электроны которой у этих элементов тоже принимают участие в химических реакциях. Посмотрите на схему и посчитайте сами, сколько у них электронов в каждой из оболочек. У этих элементов внутренние электронные оболочки одинаковы: самая ближняя к ядру—гелиевая, за ней—неоновая, следующая — аргоновая. Все они закончены, прочно связаны с ядром. Одинаковы и самые наружные оболочки, в них только по два электрона (см. цв. табл. на стр. 600).

Это создает сходство между железом, кобальтом и никелем, подмеченное уже много лет тому назад.

Достройка внутренних оболочек атомов существует у элементов, находящихся в длинных периодах таблицы Менделеева. Особенно резко она выражена в семействе редких земель, элементов, почти неотличимых друг от друга.

ПОЧЕМУ И КАК СОЕДИНЯЮТСЯ МЕЖДУ СОБОЙ АТОМЫ

Очень прочны электронные оболочки «ленивых» элементов. Очень крепко держат свои электроны атомы благородных газов, стоящих в нулевой группе периодической системы.

Если потеряют свои слабо связанные электроны атомы металлов калия, натрия, кальция и других элементов, стоящих в первых группах таблицы, то их электронные оболочки станут такими же, как оболочки атомов ближайших благородных газов, стоящих перед ними в таблице.

У элементов, например, седьмой группы во внешней электронной оболочке находится семь электронов. Если такой элемент захватит один электрон, то его электронная оболочка станет такой же, как оболочка ближайшего, следующего за ним в таблице элемента нулевой группы.

При химических реакциях происходит такое перераспределение наружных электронов, что все внешние электронные оболочки стремятся стать такими же, как у ближайших благородных газов. У кислорода, например, для этого не хватает двух электронов. У водорода — один лишний. Поэтому при образовании воды каждый атом кислорода соединяется с двумя атомами водорода, захватив у них те самые два электрона, которых недостает его внешней электронной оболочке.

Какие же силы связывают атомы при образовании молекул? Теперь это стало ясным. Ведь атом элемента, потерявший электрон, будет заряжен положительно, а атом, захвативший лишний электрон, будет заряжен отрицательно. Между разноименно заряженными атомами возникнут силы электрического притяжения. С ними нетрудно наглядно познакомиться. Возьмите гребенку, причешитесь или потрите ее о сукно и поднесите к обрывкам бумажек. Бумажки «оживут», подпрыгнут и притянутся к гребенке.

Электронные заряды, появившиеся на гребенке, притягивают бумажки. Вот при этом и проявляются те самые силы, что связывают атомы друг с другом. Это они создают несокрушимую прочность гранита, стали. Это им обязан твердостью алмаз.

Конечно, невольно возникает сомнение, каким же образом эти ничтожные силы, еле способные удержать пушинку, обеспечивают такую прочность. А как вы думаете, с какой силой стали бы притягиваться друг к другу электроны и положительно заряженные ядра одного грамма водорода, если бы мы могли разделить их и раздвинуть на расстояние, чудовищно большое по сравнению с размерами атома, на расстояние, превышающее диаметр атома в десятки миллионов раз, на расстояние в один миллиметр. Нетрудно сосчитать, что эта сила будет гораздо больше, чем вес всего земного шара.

Таким образом, силы, связывающие атомы в молекулы, возникают в результате взаимодействия положительных ядер и отрицательных электронных оболочек атомов.

Это взаимодействие всегда стремится к такой перестройке внешней электронной оболочки, чтобы она стала наиболее прочной, наиболее устойчивой, такой же, как у ближайшего элемента нулевой группы.

Например, при соединении двух атомов водорода в молекулу, оба электрона от обоих водородных атомов образуют вместе общую электронную оболочку (сходную с гелиевой) вокруг обоих ядер.

ПЕРИОДИЧЕСКАЯ ТАБЛИЦА НАШИХ ДНЕЙ

Чем же отличается периодическая система химических элементов Менделеева наших дней от той, которую знали химики во времена ее творца? Большая ли между ними разница?

Пожалуй, наиболее правильным будет неожиданный ответ: периодическая таблица наших дней одновременно и осталась без изменения и отличается очень сильно от таблицы времен Менделеева.

Ее построение не изменилось и не могло измениться, так как оно выражает самые общие закономерности природы, а они неизменны. Осталось неизменным расположение элементов, число и длины периодов. Это та же самая таблица Менделеева.

Но она и сильно изменилась.

И самые большие и важные изменения произошли внутри каждой клетки менделеевской таблицы. Лучше всего сравнить одну и ту же клетку, занимаемую одним и тем же элементом,— какой она была раньше и какова теперь.

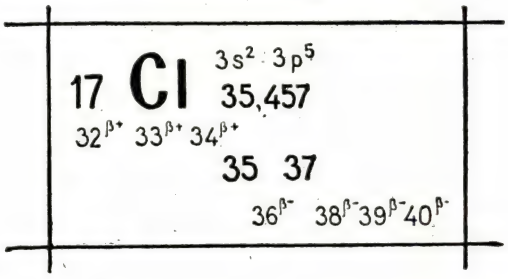
Выберем для сравнения ту клетку, которую занимает самый обычный для химика элемент— хлор. Его клетка в периодической системе находилась в конце третьего периода в седьмой группе. Там же, конечно, она находится и теперь.

Но во времена Менделеева она имела вот какой вид:

Хлор Cl 35,45

Больше нечего было поместить внутри клетки. Был известен элемент хлор с точно измеренным атомным весом 35,45, химия которого определялась положением его места в таблице.

В наше время клетка хлора, так же как и других элементов, сильно изменилась. Вот как она выглядит теперь:



Что же обозначают эти таинственные цифры и значки?

Появилась в клетке хлора цифра 17 — это его атомный, или порядковый, номер. Он говорит, что в ядре атома хлора семнадцать элементарных положительных зарядов, и вокруг ядра вращаются семнадцать электронов.

Наверху стоят цифры и буквы, похожие на какой-то таинственный шифр.

Это так и есть. Этими знаками зашифровано число электронов в атоме хлора и строение его внешней электронной оболочки. Эти электроны и определяют химические свойства элемента.

Например, хлор сильно агрессивный, реакционно способный газ. У него в индексе строения электронной оболочки стоят цифры $3s^2$ $3p^5$. Они указывают, что у этого

элемента из общего числа 17 электронов во внешних частях электронной оболочки имеются семь (2+5) слабо связанных электронов. Они и обеспечивают огромное разнообразие химических реакций хлора.

Атомный вес хлора измерен более точно: он найден теперь равным 35,457, но эти цифры имеют теперь уже другой смысл: это средний атомный вес хлора, так как в наши дни мы уже знаем, что существует не один хлор, а несколько. Известны, по крайней мере, девять различных хлоров. Девять изотопов хлора, девять атомов с одинаковым зарядом ядра и одинаково построенной электронной оболочкой, но с разным атомным весом.

Одни из них устойчивы, они существуют в природе. Другие созданы заново человеком, они рождаются в атомных котлах или в циклотронах, построенных людьми.

Это радиоактивные хлоры.

В нижней части клетки хлора и перечислены изотопы хлора и их атомные веса.

Мы знаем теперь, что в природе существуют два разных хлора. «Легкий» хлор с атомным весом 35 и «тяжелый» с атомным весом 37, а обычный хлор представляет их смесь со средним атомным весом 35,457; легкого хлора в природном хлоре значительно больше.

Другие изотопы хлора радиоактивны. Три из них испускают при распаде позитроны, что отмечено в клетке знаком β^+, это хлоры с атомным весом 32, 33 и 34.

Четыре — при распаде испускают обычные β-лучи, являющиеся, как известно, потоком электронов, что обозначено значком β^-. Это хлоры с атомным весом 36, 38, 39 и 40.

Вот как много сведений дает теперь каждая клетка менделеевской таблицы.

Чем еще отличается современная таблица периодической системы элементов от ее предшественницы во времена Менделеева?

Прежде всего тем, что в ней уже нет «пустых» мест. Она заполнена. И она не только заполнена, но даже продолжена далеко за пределы урана — 92-го элемента, который когда-то был последним в таблице.

Могущество человеческой мысли, могущество разума, науки раздвинуло границы природы, и мы знаем теперь элементы, лежащие за последним элементом. Но нельзя сказать, что они были найдены.

Нет, они созданы человеком, и эти новые, не существовавшие в природе элементы по своим свойствам тоже подчиняются великому периодическому закону.

КАК БЫЛИ СОЗДАНЫ ТРАНСУРАНОВЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ

Вопрос о границах периодической системы, пожалуй, наиболее сложен. Сколько элементов существует в природе? Сколько их может быть создано человеком?

В пределах от водорода до урана их ровно девяносто два — ни больше, ни меньше. Это доказано периодическим законом. До водорода нет ни одного — не может быть атомов с зарядом ядра меньше единицы.

Но сколько элементов за ураном?

На этот вопрос периодический закон химических элементов ответа не дает.

Д. И. Менделеев не считал, что уран является последним элементом его таблицы. Он допускал возможность существования еще по крайней мере пяти элементов за ураном. Вы можете видеть места, оставленные для них в его первой таблице (стр. 586).

Много труда положили химики, разыскивая в природе элементы тяжелее урана. Не раз в научных журналах появлялись торжествующие извещения о достоверном «открытии» нового тяжелого элемента с атомным весом большим, чем у урана. Например, элемент № 93 «открывали» в природе многократно, он получал имена: «богемий», «секваний». Но эти ложные открытия оказывались каждый раз следствием ошибок. Они по существу характеризуют чрезвычайную трудность точного аналитического определения ничтожных следов нового неизвестного элемента с неизученными свойствами.

Результат этих поисков был отрицательный, потому что элементов, соответствующих тем клеткам таблицы Менделеева, которые должны быть расположены за клеткой № 92, на Земле нет. Уран — последний.

Первые попытки искусственного получения новых элементов тяжелее урана были связаны с одной из замечательных ошибок в истории развития науки.

Было замечено, что под влиянием потока нейтронов многие элементы становятся радиоактивными и начинают испускать β-лучи.

Но мы знаем, что ядро атома в результате испускания отрицательного заряда сдвигается в периодической таблице на одну клетку вправо, и его порядковый номер становится на единицу больше — происходит превращение элементов. Под воздействием нейтронов образуются более тяжелые элементы.

Естественно, что была сделана попытка подействовать нейтронами и на уран. Ученые

надеялись, что, так же как и у других элементов, у урана при этом появится β-активность и в результате β-распада возникнет новый элемент с номером на единицу больше, который и должен был бы занять 93-ю клетку в системе Менделеева. Было высказано предположение, что он должен быть похож на рений и дали ему имя экарений (об этом см. также стр. 532—534).

Первые опыты, казалось, сразу же подтвердили такое предположение. Даже больше, было обнаружено, что при этом возникает не один новый элемент, а несколько. Были опубликованы сообщения о возникновении сразу шести новых элементов тяжелее урана. Кроме экарения, были «обнаружены» экаосмий, экаиридий, экаплатина и эказолото.

И все это оказалось ошибкой. Но это была замечательная ошибка. Она привела науку к величайшему из достижений физики за всю историю человечества — овладению энергией атомного ядра.

Оказалось, что все было не так. Никаких трансурановых элементов найдено не было. Среди странных новых элементов, у которых тщетно пытались найти предполагаемые свойства, которыми должны были бы обладать элементы от экарения до эказолота, вдруг неожиданно были обнаружены радиоактивные барий и лантан. Не трансурановые, а самые обычные, места которых находятся посередине периодической таблицы Менделеева.

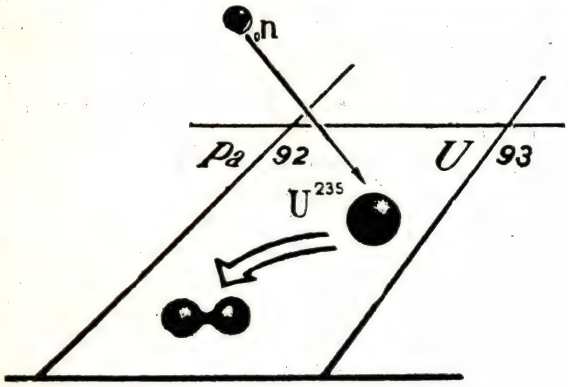


Рис. 5. При попадании нейтрона в ядро урана-235 оно возбуждается, в нем возникают сильные колебательные движения, похожие на колебания капли воды.

Прошло немало времени, прежде чем этот очень неожиданный и очень странный результат был правильно понят.

Почему из атомных ядер урана, стоящего в конце периодической системы элементов, при действии нейтронов образуются ядра элементов, места которых находятся в ее середине? Например, было найдено, что при действии нейтронов на уран возникают элементы, соответствующие следующим клеткам периодической системы:

35 Бром и 57 Лантан
36 Криптон и 56 Барий
37 Рубидий и 55 Цезий
38 Стронций и 54 Ксенон
39 Иттрий и 53 Йод
40 Цирконий и 52 Теллур

и целый ряд других элементов.

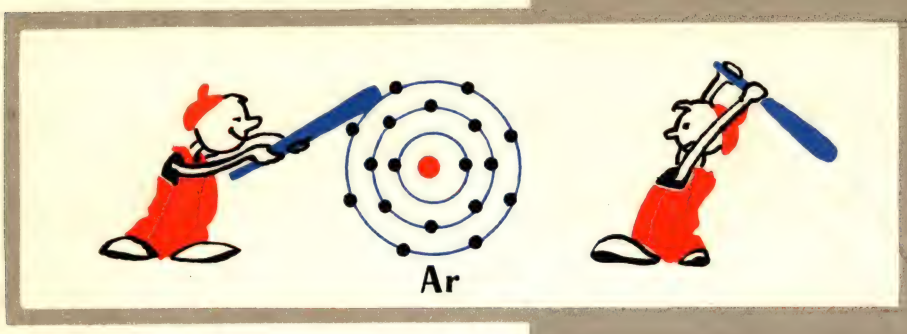
Много элементов было найдено в невообразимо сложной смеси радиоактивных изотопов, образующихся в облученном нейтронами уране. Хотя все они оказались старыми, давно знакомыми химикам элементами, но в то же время это были новые вещества, впервые созданные человеком.

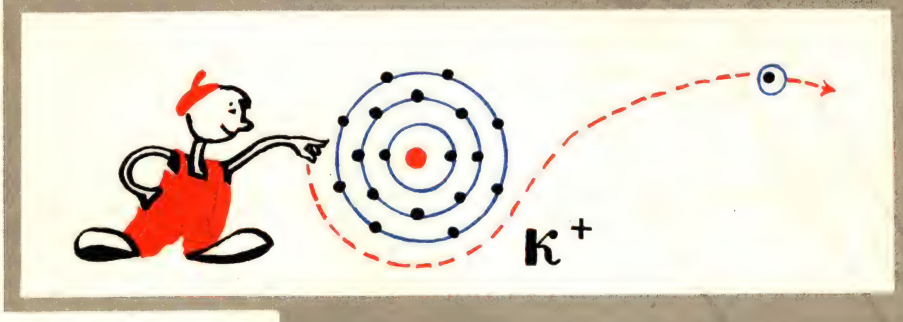
В природе нет радиоактивных изотопов брома, криптона, стронция и других элементов из числа тридцати пяти от цинка до европия, возникающих при облучении урана.

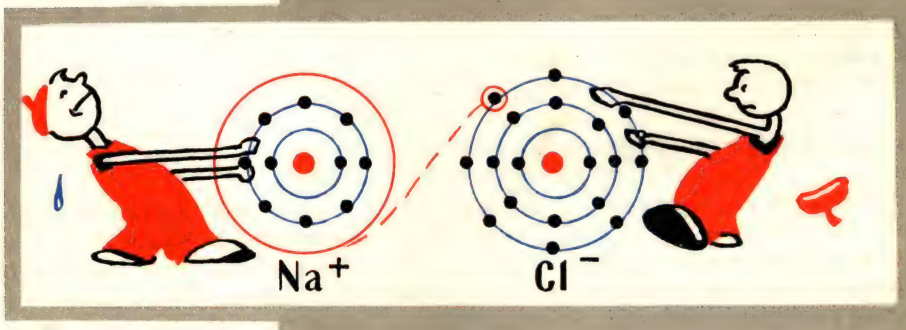
В науке часто так бывает: самое загадочное и самое сложное оказывается простым и ясным, когда оно разгадано и понято. Оказалось, что при попадании нейтронов в ядра урана последние раскалываются, расщепляются на два «осколка» — два атомных ядра меньшего веса. Эти осколки могут быть различной величины, поэтому-то и образуется так много различных

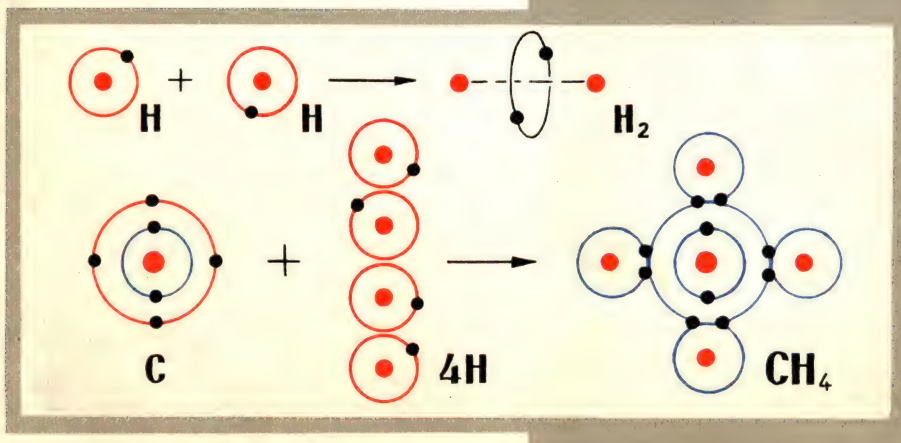
Таблица 37. В верхней части рисунка изображено начало периодической системы. Для двух первых периодов приведены схемы электронных оболочек атомов. Обратите внимание, что общее число электронов соответствует порядковому номеру элемента, а число электронов внешней, валентной, оболочки равно номеру группы, в которой находится элемент в таблице Д. И. Менделеева (на схеме обозначено красным цветом). Устойчивые электронные оболочки газов гелия, неона, аргона сохраняются в строении атомов элементов всех последующих периодов, образуя их внутренние электронные оболочки (показаны голубым цветом). Внизу изображено строение атомов трех элементов, занимающих вместе одну клетку в периодической системе: железа, кобальта и никеля. Они находятся в середине длинного четвертого периода. У них внешние электронные оболочки одинаковы, у каждого на этих оболочках по два электрона. Поэтому их химические свойства очень близки друг другу. Но в химических реакциях у этих элементов могут принимать участие и электроны, находящиеся на более глубокой электронной оболочке. Она у них еще недостроена. На ней может находиться самое большее десять электронов, а на внешней — восемь. Они обе заполняются только у 36-го элемента — благородного газа криптона.

I
II
III
IV
V
VI
VII
VIII
O
1
2
3
1 H
2 He
3 Li
4 Be
5 B
6 C
7 N
8 O
9 F
10 Ne
11 Na
12 Mg
13 Al
14 Si
15 P
16 S
17 Cl
18 Ar
26 Fe
27 Co
28 Ni


Ar


K+


Na+
Cl−


H
+
H
H2
C
+
4H
CH4

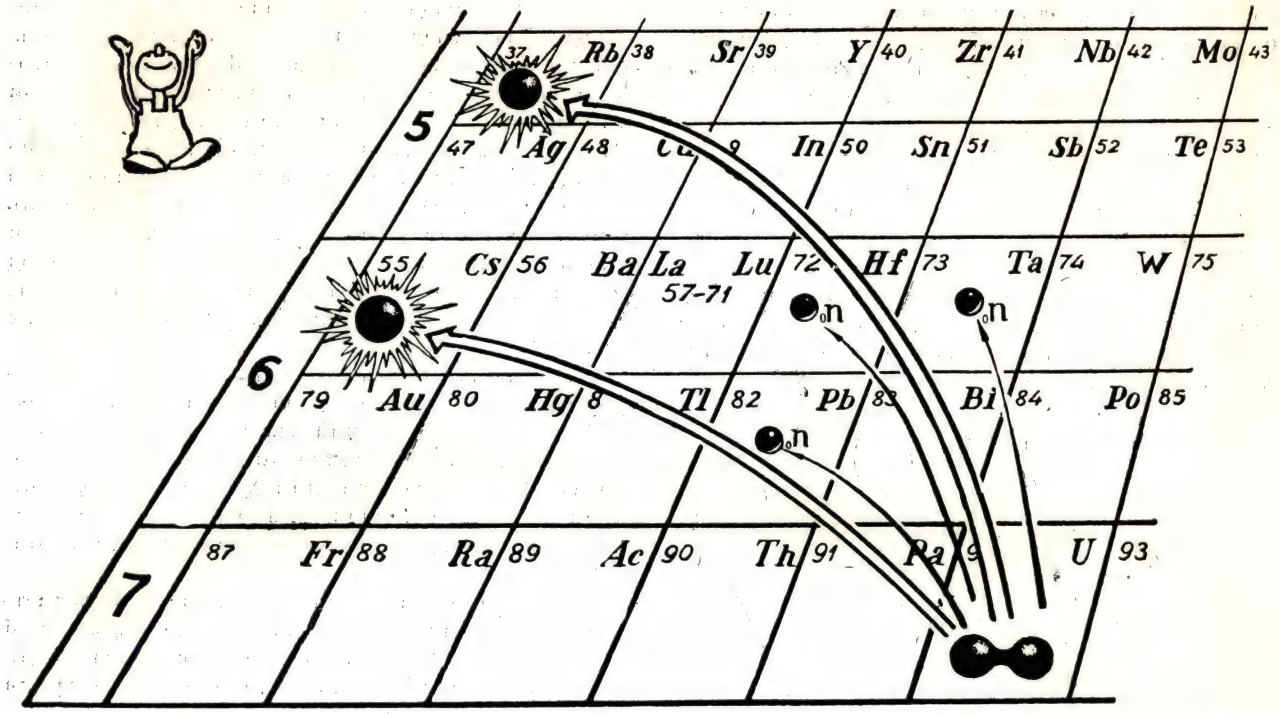


Рис. 6. Возбужденное ударом нейтрона ядро урана-235 раскалывается на две части, получаются радиоактивные изотопы элементов, находящихся в середине периодической таблицы. При таком делении урана-235 из него вылетают 2—3 новых нейтрона, каждый из которых может вызвать расщепление нового ядра урана-235.

радиоактивных изотопов обычных химических элементов.

Одно атомное ядро урана (92) распадается на атомные ядра брома (35) и лантана (57), осколки при расщеплении другого могут оказаться атомными ядрами криптона (36) и бария (56). Каждый раз сумма атомных номеров образующихся осколочных элементов будет равна девяноста двум.

Это было началом цепи великих открытий, изменяющих судьбу человечества. Вскоре было обнаружено, что расщепляются под ударами нейтронов только ядра атомов урана-235, которого в природном уране очень мало (рис. 5

Таблица 38. На верхнем рисунке изображена схема строения атома благородного газа аргона. Он обладает тремя законченными электронными оболочками: самая внутренняя — гелиевая, на ней два электрона; средняя—сходная с электронной оболочкой неона, и наружная — внешняя оболочка аргона — по восемь электронов на каждой. Все три оболочки очень прочны. Их очень трудно разрушить. При обычных химических воздействиях они остаются неизменными. Поэтому благородные газы почти не вступают в реакции и не образуют химических соединений. На втором рисунке изображено строение атома металла калия. На внешней электронной оболочке у него только один электрон. Он очень слабо связан с атомом и легко может отрываться, даже при слабых воздействиях. Образовавшийся положительный ион калия очень прочен, он построен так же, как атом благородного газа. На третьем рисунке изображена схема химической реакции между натрием и хлором. Атом металла натрия легко теряет свой единственный наружный валентный электрон. Его захватывает атом хлора, у которого во внешней оболочке недостает одного электрона. Образуются два иона: положительный натрия и отрицательный хлора. Оба они сходны с атомами благородных газов. Возникающие между ними огромные силы электрического притяжения обуславливают большую прочность химического соединения — кристаллов хлористого натрия, всем знакомой поваренной соли. На нижнем рисунке показаны схемы образования молекулы водорода из двух водородных атомов и молекулы газа метана из четырех атомов водорода и одного — углерода. При этих реакциях также возникают структуры общих электронных оболочек из электронов, принадлежавших разным атомам, аналогичные устойчивым оболочкам благородных газов.

и 6). Оказалось, что при таких распадах ядер урана, помимо осколков — ядер с меньшим атомным весом,— каждый раз возникают два-три нейтрона, каждый из которых в свою очередь способен снова вызвать расщепление атома урана. А при каждом таком распаде выделяется очень много энергии. Это и явилось началом овладения человеком внутриатомной энергией.

Среди огромного множества осколочных продуктов расщепления ядер урана впоследствии был обнаружен остававшийся долгое время незамеченным первый настоящий трансурановый элемент № 93 (рис. 7 и 8). Он возникал

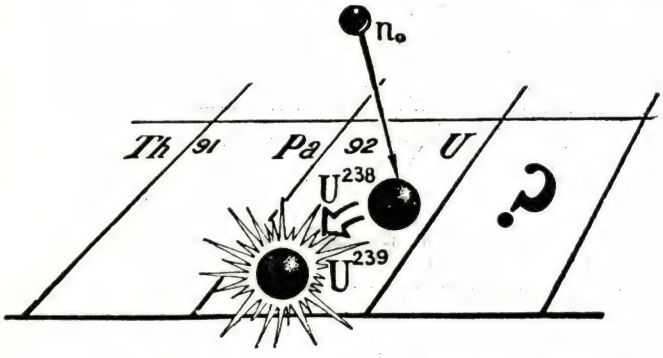


Рис. 7. Нейтрон, попавший в ядро урана-238, остается в ядре. Образуется новый изотоп урана — уран-239. Такого урана в природе нет. Это короткоживущий изотоп, обладающий β-радиоактивностью.

при действии нейтронов на уран-238. По своим химическим свойствам он оказался весьма сходным с ураном и совсем не был похож на рений, как это ожидали вначале, при первых попытках синтеза элементов тяжелее урана. Поэтому его и не могли сразу обнаружить.

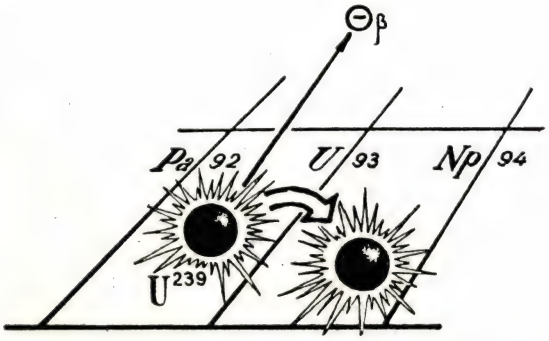


Рис. 8. При потере одной β-частицы уран-239 в соответствии с периодическим законом превращается в элемент № 93, первый трансурановый элемент — нептуний.

Первый созданный человеком элемент, лежащий за пределами «естественной системы химических элементов» (рис. 8), создание которого расширило ее границы, определенные самой природой, получил название «нептуний» по имени планеты Нептун, предсказанное открытие которой расширило границы наших знаний о солнечной системе. Сейчас уже получено очень много изотопов нептуния. Среди них есть и почти устойчивый нептуний-237, его период полураспада превышает два миллиона лет. Нептуний можно теперь получать в атомных котлах.

Вскоре был создан и 94-й элемент. Он также получил имя, взятое «с неба»,— в честь последней планеты солнечной системы. Его назвали плутонием: в периодической таблице Менделеева он следует по порядку за нептунием, аналогично последней планете солнечной системы Плутону, орбита которого лежит за орбитой Нептуна.

94-й элемент был обнаружен точно в соответствии с законами построения периодической системы (рис. 9). Он возникает из первого искусственного трансуранового элемента нептуния при его β-распаде.

Плутоний — единственный из трансурановых элементов, который теперь получают в атомных котлах в очень больших количествах. Так же как и уран-235, он способен расщепляться под действием нейтронов и применяется для изготовления атомных бомб.

95-й и 96-й элементы носят названия «америций» и «кюрий». Они также получаются теперь в атомных котлах. Оба эти элемента обладают очень большой радиоактивностью — испускают α-лучи. Радиоактивность этих элементов настолько велика, что растворы их солей нагреваются, закипают и очень сильно светятся в темноте.

Все трансурановые элементы от нептуния до америция и кюрия были получены в достаточно больших количествах, чтобы можно было подробно изучить их свойства. В чистом виде это металлы серебристого цвета, все они радиоактивны и по химическим свойствам очень похожи друг на друга, а все вместе — на уран. Среди них первоначально ожидали найти экарений, экаплатину, эказолото и т. д., но это не оправдалось. Дело в том, что, как предполагают некоторые ученые, начиная с актиния все элементы обладают одинаково построенными внешними электронными оболочками, и по мере увеличения атомного номера у них идет заполнение внутренних электронных оболочек, что

делает их похожими на редкоземельные элементы, которые принято помещать в одной клетке менделеевской таблицы.

Все новые, впервые созданные человеком элементы точно подчиняются периодическому закону.

Очень интересным элементом среди них является калифорний — шестой после урана. Его, как и других трансурановых элементов, на Земле нет. Калифорний впервые был создан по методу, основанному на периодическом законе: пластинка урана была подвергнута бомбардировке в циклотроне ядрами углерода большой энергии (рис. 10). Почему при этом должен получиться 98-й элемент калифорний — сообразите сами. Рисунок вам в этом поможет.

Недавно был выделен в чистом виде и 97-й элемент — берклий. Для этого пришлось положить чистый препарат плутония внутрь ядерного реактора, где он находился под действием мощного потока нейтронов в течение целых шести лет. За это время в нем и накопилось несколько микрограммов этого элемента. После извлечения из атомного котла плутоний растворили в кислоте, после чего из смеси был выделен наиболее долгоживущий берклий-249.

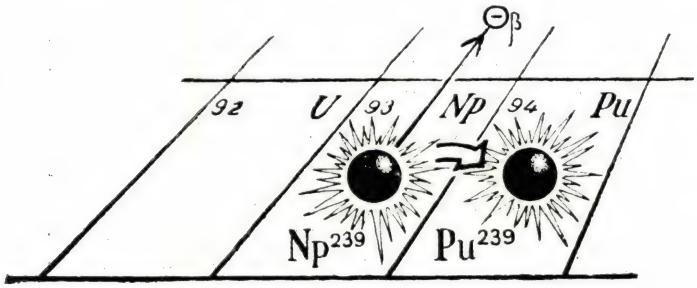


Рис. 9.

Он радиоактивен — за год распадается наполовину.

Пока удалось получить только несколько микрограммов берклия. Но этого количества хватило ученым, чтобы точно изучить его химические свойства.

Очень интересна история открытия двух следующих трансурановых элементов: 99-го и 100-го.

Впервые они были найдены в облаках и в «грязи». Для того чтобы изучить, что образуется при термоядерных взрывах, из облака взрыва с помощью самолета были собраны пробы осадка на бумажных фильтрах. В этом осадке были найдены следы присутствия двух новых элементов. Чтобы получить более точные данные, было собрано на месте взрыва большое количество «грязи» — измененной взрывом почвы и горной породы. Эта «грязь» была переработана в лаборатории, и из нее были выделены два новых элемента. Их назвали эйнштейнием и фермием в честь ученых Эйнштейна и Ферми, которым человечество многим обязано за открытие путей овладения атомной энергией: Эйнштейну принадлежит закон эквивалентности массы и энергии, а Ферми построил первый атомный реактор.

Найдены и другие методы получения обоих этих элементов, правда, пока еще в столь исчезающе малых количествах, что даже увидеть их пока никому не удалось.

Но самым великим достижением, которым по справедливости может гордиться наука, следует назвать создание 101-го элемента, получившего имя великого творца периодической системы химических элементов, положившей начало овладению тайнами строения атома,— имя Дмитрия Ивановича Менделеева.

Менделевий был получен следующим образом (рис. 11). На листочек тончайшей золотой

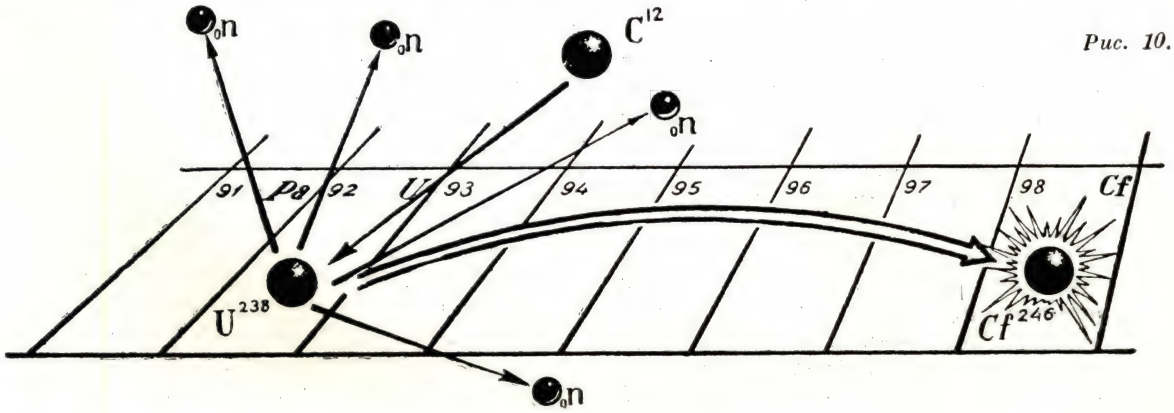


Рис. 10.

фольги было нанесено совершенно невидимое покрытие, состоящее приблизительно из одного миллиарда атомов эйнштейния. Альфа-частицы очень большой энергии, пробивая золотую фольгу с обратной стороны, при соударении с атомами эйнштейния могли вступать в ядерно-химическую реакцию с образованием атомов нового 101-го элемента. При таком соударении образовавшиеся атомы менделевия вылетали с поверхности золотой фольги и собирались на другом, расположенном рядом тончайшем золотом листочке. Таким остроумным путем удавалось выделить в чистом виде атомы 101-го элемента из сложной смеси эйнштейния и продуктов его распада. Невидимый налет смывался кислотой и подвергался радиохимическому исследованию.

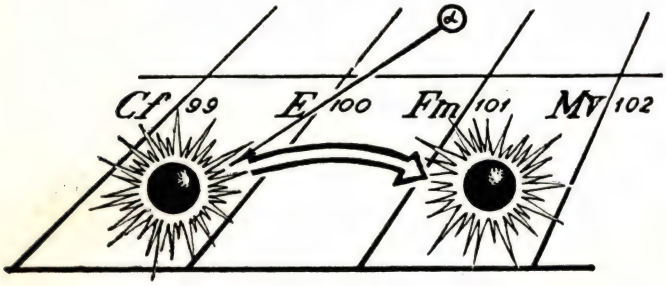


Рис. 11.

Поистине это было чудо. Исходным материалом для создания 101-го элемента в каждом отдельном опыте служил приблизительно один миллиард атомов эйнштейния. Это очень мало — значительно меньше одной миллиардной доли миллиграмма, а получать эйнштейний в большем количестве было невозможно.

Заранее было подсчитано, что из всего миллиарда атомов эйнштейния при многочасовой бомбардировке альфа-частицами может прореагировать всего только один единственный атом эйнштейния и, следовательно, может образоваться только один атом нового элемента.

Нужно было не только суметь его обнаружить, нужно было сделать это таким путем, чтобы в то же время выяснить только по одному атому химическую природу элемента.

И это было сделано. Успех опыта превзошел расчеты и ожидания. Удалось заметить при одном эксперименте не один, а пять атомов нового элемента. Этого оказалось достаточно для того, чтобы установить и факт образования нового элемента, и его место в периодической системе, и его радиоактивные свойства (оказалось, что это альфа-активный элемент с периодом полураспада около получаса), и определить его основные химические свойства.

Открытие менделевия—это вершина экспериментального мастерства ученых, это величайшее торжество периодического закона и теории строения атома. Это замечательный памятник менделеевской системе, в течение почти столетия служившей ключом к открытию элементов.

Уже ведутся работы по созданию следующего, 102-го элемента, и можно быть уверенным, что он будет создан.

ЗАГЛЯНЕМ В БУДУЩЕЕ

Пустых мест в менделеевской таблице больше нет. Все они уже заполнены. Все элементы открыты. Уже создано немало новых, каких никогда на Земле не бывало. На 101-м месте в периодической таблице стоит теперь элемент, носящий славное имя ее творца.

Так, может быть, все уже сделано? Может быть, могучая идея Д. И. Менделеева, в течение многих десятков лет руководившая развитием химии, завершила все, что она могла дать, и для нее остается только почетная роль повседневной помощницы химиков в их будничной работе?

Может быть, принцип периодичности, на котором основана естественная система химических элементов, ограничен только электронной оболочкой атомов?

Нет, это не верно.

Когда великий ученый начинал свою работу над естественной системой химических элементов, из 92 изучены были 63, а о существовании многих других вообще никто не подозревал.

Сколько же элементов мы знаем теперь?

Сколько изотопов известно для каждого элемента? Сколько различных атомных ядер существует в природе? Сколько новых создано человеком?

Всего мы знаем 101 элемент. Есть основание считать, что скоро будет открыт 102-й. Нет ни одного элемента, у которого был бы только один изотоп. Одни элементы состоят из десятков различных сортов атомов, у других их меньше. Есть элементы, у которых вообще нет устойчивых изотопов; но нет ни одного элемента, у которого не было бы радиоактивных изотопов.

Всего известно более 1400 различных атомных ядер для 101 элемента. Сколько же из них создала природа и сколько создано человеком?

Такое сопоставление приводит к неожиданному и удивительному результату.

В природе найдены для 92 элементов только 275 стабильных изотопов и около 50 радиоактивных.

15 радиоактивных изотопов принадлежат ряду распада урана. В ряде тория тоже пятнадцать. Тринадцать изотопов в ряде распада урана-235. У всех остальных элементов известны только семь радиоактивных изотопов: это калий-40, рубидий-87, индий-115, лантан-138, самарий-147, лютеций-176, рений-187; непрерывно образуется в природе и исчезает радиоактивный изотоп углерода C^{14}. Вот и все! Правда, за последние годы были обнаружены признаки радиоактивности еще у 39 изотопов различных элементов.

А только за два десятилетия, протекшие с той поры как были найдены пути создания новых элементов, человек уже сумел создать свыше тысячи ста новых радиоактивных изотопов, новых атомных ядер для всех элементов без исключения.

Менделееву были известны 63 элемента, когда он установил одну из наиболее общих закономерностей природы — периодичность изменения химических свойств элемента в зависимости от его атомного веса.

Науке наших дней (1959 г.) известны 1422 различных типа атомных ядер, 1422 различных изотопа для 101 элемента.

Будут ли установлены когда-нибудь какие-либо общие закономерности в тех свойствах вещества, которые зависят только от атомного ядра? Это очень большой и принципиально важный вопрос. От ответа на него зависит будущее человеческого познания природы. Ответ на него — это путь к познанию строения атомного ядра, сегодня во многом еще недоступного. Но мы уже можем сказать, что это будет наукой сделано. И начало ответа на этот важнейший вопрос, решение которого будет дано наукой будущего, намечается в периодической таблице атомных ядер.

Посмотрите внимательно на начальную часть таблицы (стр. 593), которую можно назвать прообразом периодической таблицы будущего.

Это по существу та же периодическая таблица, но в каждой клетке ее приведены все атомные ядра, известные для того или иного элемента. Целиком напечатать ее здесь нельзя — она слишком громоздка. Здесь изображено только ее начало от водорода до кальция. В ней приводятся все изотопы всех известных в наши дни элементов — как природные, так и искусственные. В ее пестром узоре разобраться не трудно. Квадратиками в ней обозначены стабильные ядра, кружочками со стрелкой — β-активные; у ядра, испускающего при β-распаде электроны, стрелка направлена вниз; если же ядро испускает при β-распаде позитроны, то стрелка направлена вверх. Все ядра с позитронным распадом созданы искусственно, в природе их не было.

Каждый элемент занимает в этой таблице свой столбец. Номер столбца соответствует заряду ядра — порядковому номеру элемента. Атомные ядра различных элементов с равными атомными весами, или, точнее сказать, с одинаковыми массовыми числами (такие ядра называют изобарами), заключены между параллельными наклонными линиями.

Например, столбец № 16 занимает сера. Для нее известны изотопы с β^+-активностью (S^{31}); устойчивые изотопы: S^{32}, S^{33}, S^{34}, S^{36} и изотопы с β^--активностью: S^{35}, S^{37}. Наклонный столбец для массового числа 32 указывает, что одним и тем же атомным весом обладают изотопы: Si^{32}, P^{32}, S^{32}, Cl^{32}.

Обратите внимание на проходящую посередине таблицы толстую черную линию. Зубчатой чертой она соединяет устойчивые изотопы смежных элементов. Присмотритесь: у всех ядер, расположенных под этой чертой, стрелки направлены вверх, а над ней — вниз. Она разделяет позитронную и электронную β-неустойчивость атомных ядер.

Очень много замечательно интересных данных содержит таблица атомных ядер, но еще больше она таит в себе. Можно быть уверенным, что даже представить себе трудно, сколько тайн будет открыто и какими необъятными возможностями она поможет овладеть науке.

В таблице атомных ядер четко выражена одна замечательная закономерность, она сразу бросается в глаза. Присмотритесь к таблице внимательно, и вы сами заметите различие между четными и нечетными элементами.

Каждый нечетный элемент начиная с фтора имеет только один (иногда два) устойчивый изотоп, а все четные имеют по нескольку устойчивых изотопов. Например, у фтора — девятого элемента — есть один нерадиоактивный изотоп, но зато у его соседей с обеих сторон (у восьмого — кислорода и десятого — неона) их по три.

Эта загадочная закономерность может быть прослежена во всей таблице для всех элементов.

В качестве примера можно выбрать уже знакомую нам триаду: железо — кобальт — ни-

кель. Для четного железа известны четыре устойчивых изотопа, для четного никеля — пять, а для нечетного кобальта только один.

Очевидно, что с закономерностью чередования устойчивости четных и нечетных ядер связана и замечательная закономерность распространенности четных и нечетных элементов в земной коре и во всем мироздании.

Но не надо думать, что этим и ограничивается периодическая закономерность, проявляющаяся в таблице атомных ядер.

Систематическое изучение свойств огромного числа стабильных и радиоактивных ядер всех природных и искусственных изотопов приводит к удивительному выводу о существовании в атомном ядре энергетических уровней, подобно тому как существуют энергетические уровни во внешних электронных оболочках атомов.

Из курса физики вы знаете, что атомные ядра построены из протонов — ядер атомов водорода, несущих положительный заряд, и нейтронов, масса которых почти точно равна массе протона и которые не имеют заряда.

Сопоставление самых разнообразных свойств изотопов, зависящих от атомного ядра, с числом нейтронов или протонов, входящих в его состав, приводит к выводу, что в ядрах существуют нейтронные и протонные оболочки и существуют периоды в строении атомных ядер, так же как существуют периоды в строении атомных оболочек. И если электронные оболочки становятся особенно устойчивыми, когда они содержат 2 (гелий), 10 (неон), 18 (аргон), 36 (ксенон) и 86 (радон) электронов, то внутриядерные нейтронные и протонные оболочки становятся наиболее устойчивыми, когда в атомных ядрах содержится 2, 8, 20, 50, 82 или 126 протонов или нейтронов. Эти удивительные числа — они недаром получили название «магических» чисел — определяют устойчивость атомных ядер и особую периодичность в изменении их физических свойств. Изотопы с магическими числами протонов или нейтронов обладают особенно высокой распространенностью в природе, особенно большим числом стабильных изотопов, они наиболее устойчивы по отношению к захвату нейтронов при ядерных реакциях, они наиболее прочны, совершенно подобно тому, как наиболее прочны атомы благородных газов. Изучение таких свойств атомных ядер, как магнитные свойства, абсолютная распространенность, дефект массы ядра, энергия связи, радиоактивность, показывает, что в них наблюдаются периодические изменения с периодами, обусловленными наличием в некоторых ядрах магического числа протонов или нейтронов. На этих устойчивых ядрах заканчиваются периоды в таблице атомных ядер аналогично тому, как в таблице химических элементов периоды заканчиваются на устойчивых атомах благородных газов.

На начальном участке таблицы атомных ядер намечены три первых магических числа: 2, 8 и 20.

Рано еще говорить, что уже существует периодическая система атомных ядер, но великий закон Менделеева о периодической закономерности в свойствах химических элементов явно оказывается справедливым не только для внешней электронной оболочки атома, но и для атомного ядра, так недавно еще недоступного исследователю.

Это указывает на то, что возможности, заключенные в периодическом законе, неисчерпаемы.

Можно быть уверенным, что в ближайшие годы будет создана периодическая система атомных ядер, будут вскрыты глубокие закономерности, связывающие свойства ядра с его количественными характеристиками.

В руках химиков сегодняшнего дня периодическая таблица элементов служит могучим оружием в борьбе за создание новых химических веществ с заранее заданными свойствами, нужными человеку. Подобно этому периодическая система атомных ядер для химика будущего станет первой ступенью на пути к осуществлению направленного синтеза новых элементов с невиданными свойствами — тех, которые будут необходимы человеку будущего.

ПЕРИОДИЧЕСКИЙ ЗАКОН И ХИМИЯ ВСЕЛЕННОЙ

Не ограничиваются ли роль и значение закона Менделеева только областью химии? Быть может, он важен и нужен только химикам? Он помогает им познавать химические свойства вещества, дает возможность создавать новые соединения с замечательными и удивительными свойствами. Но нужен ли он биологам, изучающим жизнь, геологам, проникающим в глубь земного шара, астрономам, открывающим тайны мироздания? Быть может, их он ма-

ло интересует, чужд им, далек, так же как далека сияющая на небосводе звезда от пробирок и колб в лаборатории химика?

Нет, это не так.

Можно найти много примеров, показывающих, какое значение имеет великий периодический закон в самых разнообразных областях знания, изучающих самые разнообразные области и стороны мира. Совершенно очевидно, как он необходим школьнику, только начинающему изучать химию. А если седовласый академик перестал заглядывать в таблицу Менделеева, то это просто потому, что он давно знает ее наизусть.

ХИМИЯ ЗЕМЛИ

Что наиболее важно для геологов, исследующих нашу планету? Конечно, знание самых общих законов, определяющих поведение вещества как на поверхности, в земной коре, так и в глубинах земного шара. Геолог не может искать вслепую. Он заранее должен знать, где он может найти железо, где — уран, где — фосфор, углерод (алмазы) и т. д. Он должен знать, какие элементы сопутствуют друг другу в земной коре, должен знать законы образования совместных месторождений различных элементов.

Периодический закон является основой самых важных, самых широких геохимических обобщений, которыми руководствуются геологи в своих поисках новых месторождений того или иного элемента. В самых сложных, самых грандиозных химических процессах, протекавших в течение сотен миллионов лет в земной коре и продолжающихся в наши дни, сходные по своему положению в периодической системе элементы обладают сходной геохимической судьбой. Это позволяет геохимикам проследить их движение в земной коре и выяснить законы, управляющие их распространением на поверхности земного шара.

Геологи знают, например, где они должны искать очень важные и нужные для современной техники металлы осмий и иридий. Они находятся в земной коре всегда вместе с платиной, так же как в периодической таблице Менделеева они стоят вместе, в восьмой группе.

Мы уже знаем, что кобальт и никель сопутствуют в своих месторождениях железу и вместе с ним находятся в таблице.

Геохимическое поведение различных элементов определяется прежде всего строением внешних электронных оболочек их атомов. Те из них, которые обладают законченными внешними электронными оболочками, — благородные газы, не вступающие в химические соединения,— существуют только в земной атмосфере. Даже гелий и радон, образовавшиеся при распаде радиоактивных элементов, не только остаются плененными в горных породах, но и непрерывно поступают в атмосферу.

Элементы, расположенные в коротких периодах и в начале и в конце каждого из длинных периодов таблицы, образуют основную толщу земной коры. Это из них состоит основная масса силикатных горных пород. Элементы, стоящие в периодической системе в середине длинных периодов, образуют рудные, чаще всего сульфидные, месторождения. Многие из этих элементов встречаются и в самородном состоянии (см. цв. табл. на стр. 593).

Периодическая система элементов помогает геохимику устанавливать общие закономерности во взаимном сосуществовании различных элементов в горных породах и рудах. Она дает возможность геологу находить в толще земной коры месторождения полезных ископаемых.

ХИМИЯ МЕТЕОРИТОВ

Огромное значение для познания мира имеет проблема численного соотношения между атомами различных элементов. Каких атомов в мире больше? Этот вопрос очень важен и для решения загадки происхождения элементов — загадки взаимного превращения вещества в мироздании, и для решения важнейшего вопроса всего естествознания — вопроса о происхождении и развитии звездных миров.

В наши дни наука уже сумела найти пути подхода к решению этих больших вопросов. И эти пути также не могут миновать периодический закон. Теория образования элементов, развитая на основе изучения физики атома, приводит к очень важному выводу, что относительная распространенность атомов того или иного элемента во Вселенной определяется зарядом ядра, т. е. его номером в периодической системе элементов Менделеева. Значит, такое свойство элемента, как распространенность в мироздании, определяется строением его атомных ядер, законами их образования и превращения, законами новой, зарождающейся в наше время химии будущего — ядерной химии.

И что самое поразительное, ядерная химия уже открыла существование удивительных, «магических» закономерностей, указывающих на еще не известный периодический закон в строении атомных ядер различных элементов. Этот

загадочный закон проявляется в периодической зависимости устойчивости атомных ядер от порядкового номера элемента в периодической системе Менделеева.

Периодическая закономерность в химии ядерных превращений очень сходна с законом периодического изменения химических свойств элементов, который был открыт Менделеевым. Периодический закон Менделеева привел науку к раскрытию тайны строения внешних частей атома. Несомненно, что «магическая» закономерность в свойствах атомных ядер также ждет нового Менделеева, который сейчас, может быть, еще только читает этот том Детской энциклопедии.

Но уже и в наши дни ядерная химия приводит к очень интересным и важным результатам. Одним из важнейших является создание теории распространенности химических элементов. Она основана на учении об устойчивости атомных ядер и вероятности их образования.

Эта теория приводит к выводу, что относительное количество атомов каждого элемента в мире зависит от его положения в периодической таблице — от его атомного номера. И распространенность элементов тоже представляет собой очень интересную и странную периодическую зависимость: в мире преобладают атомы с малыми номерами, стоящие в начале периодической таблицы; атомов элементов с четными порядковыми номерами в мире больше (86%), чем их соседей — элементов с нечетными номерами (14%).

Ученые-геохимики изучают состав земной коры, изучают законы, управляющие движением элементов в течение миллионов лет тех геологических эпох, когда образовались залежи железных руд, угольные пласты, золотые россыпи, месторождения алмазов. Им совершенно необходимо знать общие запасы каждого элемента на земном шаре. Они проделали тысячи и тысячи анализов горных пород и минералов. Они нашли замечательные способы оценивать мощность пластов, образованных горными породами, определять, сколько весят горные хребты, какова толщина материков, сколько воды в океане, сколько ее в облаках и тучах, сколько соли во всех морях и сколько в них золота.

Геохимики сумели составить замечательную таблицу, показывающую запасы каждого из химических элементов на Земле.

Это очень интересная таблица. Из нее видно что львиная доля по составу земного шара приходится всего на шесть наиболее распространенных элементов: железо, кислород, кремний, магний, алюминий, кальций.

Вместе взятые они составляют 94% нашей планеты по весу. Наиболее распространены кислород и железо, их в 1 000 000 000 000 000 раз (10^{15}) больше, чем самых редких элементов, например полония или актиния.

Если сравнить имеющиеся на всей Земле количества железа, кобальта и никеля — элементов, стоящих рядом в восьмой группе периодической системы, то окажется, что земной шар состоит из

железа (атомный номер 26) на 36,9%,
кобальта (атомный номер 27) » 0,2%,
никеля (атомный номер 28) » 2,9%.

В заголовке этого раздела было указано, что речь пойдет о химическом составе метеоритов, а до сих пор речь шла о составе земного шара. Но, во-первых, Земля — тоже небесное тело, и, во-вторых, нужно знать химический состав Земли, чтобы сравнить его с составом метеоритов, прилетающих к нам на Землю из таинственных глубин космического пространства.

Точнейшие химические анализы огромного числа метеоритов, упавших на нашу планету, дали замечательные результаты. Оказалось, что если подсчитать среднее содержание во всех метеоритах наиболее распространенных на Земле элементов: железа, кислорода, кремния, магния, алюминия, кальция,— то на их долю падает ровно 94%, т. е. их в составе метеоритов ровно столько же, сколько в составе земного шара.

Кроме того, выяснилось, что в железных метеоритах

железа 91,0%,
кобальта 0,6%,
никеля 8,4%.

Если сравнить эти числа с относительным распространением этих элементов на земном шаре, приведенным выше, то получается совершенно поразительное совпадение: оказывается, что на Земле из этих трех элементов приходится на долю

железа $92\% = \frac{36,9}{36,9+0,2+2,9}$,
кобальта 0,5%,
никеля 7,5%,

т. е. и на Земле и в метеоритах эти элементы находятся приблизительно в одинаковых со-

отношениях. Эти и многие другие обнаруженные совпадения дали ученым основание сделать вывод: вещество на Земле и вещество в небесном пространстве одинаково. Оно состоит из одних и тех же элементов.

Каждый из элементов и на Земле и в метеоритах имеет почти одинаковый изотопный состав. Например, неоднократно проводившиеся анализы изотопного состава серы, добытой из пепла и лавы многочисленных вулканов, находящихся в различных частях земного шара, показали, что сера одинакова повсюду. Всюду отношения между количествами стабильных изотопов серы-32 и серы-34 одно и то же. Оно равно 22,200. Изотопный состав серы из метеоритов — единственных представителей Космоса, доступных прямому изучению, совершенно такой же, как и на Земле: $\frac{S^{32}}{S^{34}} = 22{,}200$. Далее оказалось, что наиболее распространенные элементы одни и те же. Даже соотношение между ними и тут и там одно и то же. Чередование элементов с четными и нечетными порядковыми номерами в периодической таблице также соблюдается одинаково и тут и там. Можно было бы, конечно, привести еще очень много примеров, показывающих большое сходство в поведении химических элементов на Земле и в космическом пространстве, отметить еще очень много общих закономерностей.

Может ли это быть случайным? Конечно, нет.

Откуда бы ни прилетали к нам на Землю случайные гости из Вселенной—быть может, это части комет, принадлежавших солнечной системе; быть может, это обломки малых планет; быть может, это вестники из чужого звездного мира,— важно одно: по своему химическому составу, по соотношению между элементами, по тем химическим соединениям, которые найдены в метеоритах, они сообщают нам, что действие великого закона Менделеева не ограничивается пределами нашей планеты. Он является единым для всей Вселенной, где могут существовать атомы с их электронной оболочкой. Материя всюду едина.

ХИМИЯ ПЛАНЕТ

О химическом составе планет известно пока очень мало. Еще меньше мы знаем о химических процессах на них. Но кое-что все-таки известно. Мы знаем, например, что в этих странных мирах существуют самые простые, самые обычные, с точки зрения химика, химические соединения.

В атмосфере Венеры найдено значительное содержание углекислого газа (CO_2).

В атмосферах планет-гигантов — на Юпитере и Сатурне — обнаружены: метан (CH_4) и аммиак (NH_3).

Больше, чем все остальные планеты, похож на Землю Марс: на нем есть вода, в его атмосфере также обнаружен углекислый газ. Все эти соединения являются наиболее характерными для элементов углерода, азота, кислорода в соответствии с их положением в периодической таблице Менделеева.

ХИМИЯ СОЛНЦА

Трудно даже и вообразить, что человек может изучить химию Солнца. Но сделать это можно. Мы теперь знаем химический состав Солнца; знаем (и даже уже довольно много знаем) о тех грандиозных процессах, которые являются источниками солнечной энергии.

Обо всем этом нам сообщают солнечные лучи. С помощью спектрального анализа на Солнце было найдено более шестидесяти элементов периодической таблицы Менделеева, тех же самых, которые есть и на нашей планете. Наверное, будут найдены и остальные.

Удалось даже определить и количественные соотношения между ними. Оказалось, что Солнце — это мир страшных, чудовищных бурь раскаленного водорода. Водородных атомов на Солнце почти в пять раз больше, чем атомов гелия, и в тысячу раз больше, чем атомов всех остальных элементов, взятых вместе.

Среди других элементов на Солнце преобладают углерод, азот и кислород. На Солнце найдено железо. Есть там и те элементы, которые наиболее распространены на Земле: кремний, магний, алюминий, кальций. Есть также калий и натрий. Найдено даже золото.

Обнаружены и простейшие химические соединения, молекулы которых способны выдерживать очень высокую температуру Солнца. Это не какие-нибудь особые, «солнечные» химические соединения — нет, химики умеют их получать и исследовать на Земле. Это простейшие радикалы: CN, OH, CH, NH. Более сложные молекулы, вероятно, на Солнце существовать не могут.

По-видимому, химия Солнца очень проста, если говорить о старой химии — химии элек-

тронных оболочек атома. Но на Солнце протекают процессы ядерной химии, причем в таких грандиозных размерах, что невозможно подобрать даже соответствующие слова, чтобы описать их. Химия Солнца является по существу первой прочтенной главой химии будущего.

Что же происходит на Солнце (и, конечно, на многих звездах, похожих на наше Солнце)? Какие превращения испытывают атомные ядра элементов на Солнце? И в этом нам помогает разобраться периодическая таблица Менделеева.

В недрах Солнца при чудовищно высоких температурах и давлении атомы многих элементов теряют почти все свои электроны. В условиях сжатого до огромной плотности газа ядра водорода — протоны — вступают в ядернохимические реакции.

Солнце — это мир водорода. Ядра остальных элементов окружены со всех сторон протонами — ядрами водорода. Атомы всех элементов, существующих на Солнце, могут сталкиваться почти только с ядрами водорода. Все остальные столкновения будут значительно реже. Если скорости и энергии сталкивающихся атомных ядер достаточно велики, то при столкновении произойдет слияние обоих ядер, ядерная реакция и возникнет новый элемент.

Вероятно, на Солнце протекает много разнообразных ядерных реакций. Далеко не все

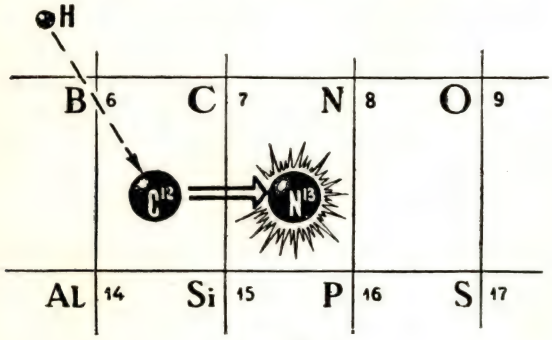


Рис. 12.

они изучены. О многих мы еще и не подозреваем. Но некоторые из них известны, и, может быть, они-то и есть самые важные, те, которые определяют природу Солнца.

Одна из них имеет особенное значение. Благодаря этой реакции Солнце является Солнцем. Это реакция между углеродом и водородом. Она протекает не сразу, а в несколько ступеней. Первая стадия этой солнечной реакции — это соединение ядер водорода с ядрами углерода, обычного углерода, того же самого, которого больше всего на нашей Земле,— изотопа углерода C^{12}. При этом возникает новое атомное ядро с семью положительными зарядами. Ведь у ядра атома углерода их шесть, а с протоном добавляется еще один. Атомный вес нового ядра увеличивается на единицу (рис. 12). С этим атомным ядром ученые знакомы, они умеют получать его искусственным путем на Земле.

Согласно правилу сдвига, элемент при увеличении заряда ядра на единицу превращается в

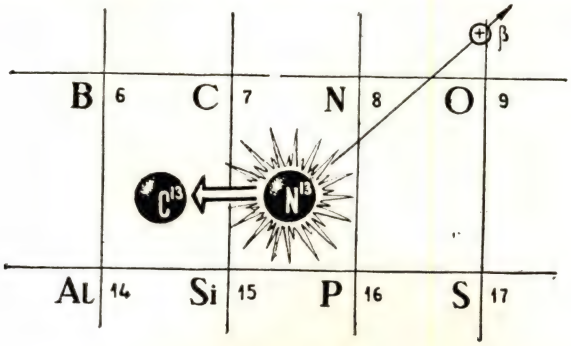
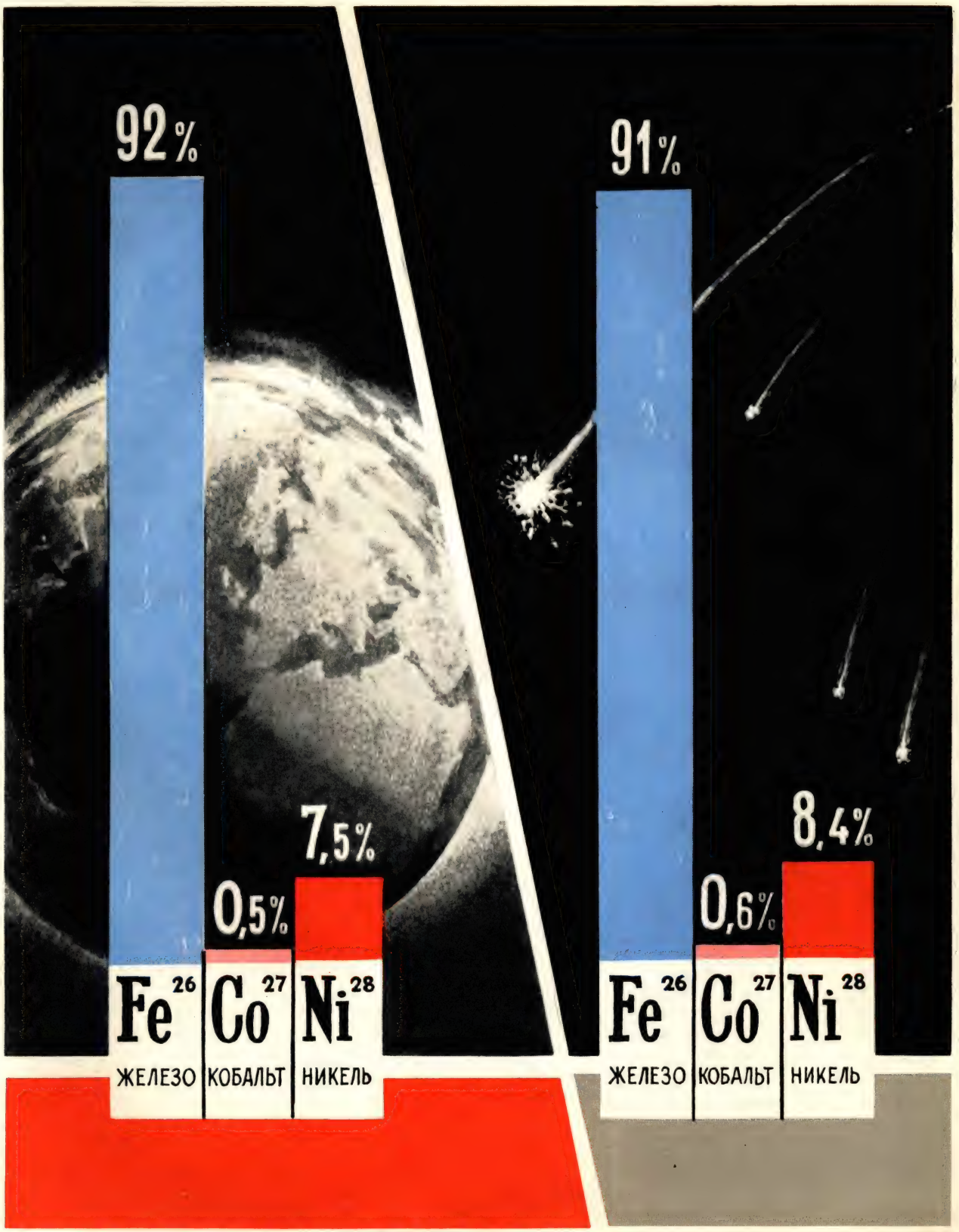


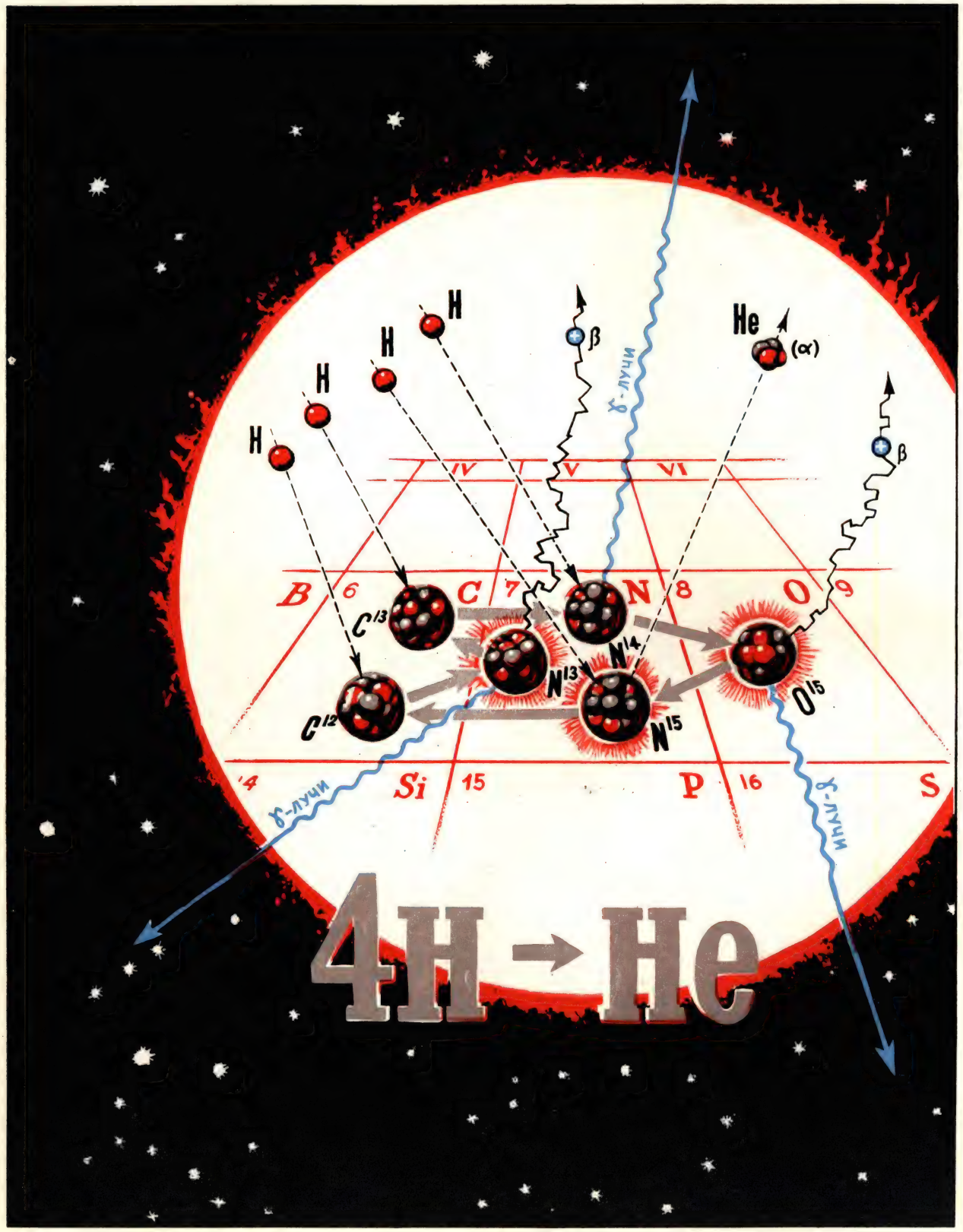
Рис. 13.

другой, занимающий в системе Менделеева следующую по порядку клетку. Углерод превращается в азот, образуется радиоактивный изотоп азота N^{13}. Период его жизни невелик: за десять минут он распадается наполовину, выбрасывая позитрон (положительный электрон), и превращается снова в углерод. Но при этом уже получается тяжелый изотоп углерода C^{13}(рис.13). Не надо думать, что это какой-то особенный, «солнечный» углерод. Нет, его много и на Земле; он вполне устойчив, и в земном углероде изотопа C^{13} около одного процента.

В результате двух последовательных реакций углерод превращается в углерод же,но в другой изотоп, с более высоким атомным весом. Это ядро тяжелого углерода C^{13}, снова подвергаясь ударам протонов, может слиться с тем из них, который будет обладать наибольшей энергией. При этом, как и следует из периодического закона, снова возникнет ядро азота, но уже с

Таблица 39. В единстве вещества в мироздании можно убедиться на примере железа, кобальта и никеля. На диаграммах показано их относительное распространение в земной коре и метеоритах. И на Земле и в метеоритах, прилетающих к нам из Вселенной, оно одинаково.


92%
0,5%
7,5%
Fe 26
ЖЕЛЕЗО
Co 27
КОБАЛЬТ
Ni 28
НИКЕЛЬ
91%
0,6%
8,4%
Fe 26
ЖЕЛЕЗО
Co 27
КОБАЛЬТ
Ni 28
НИКЕЛЬ


H
H
H
H
β
γ-лучи
He
(α)
β
IV
V
VI
B
6
C
7
N
8
O
9
C13
C12
N13
N14
N15
O15
14
Si
15
P
16
S
γ-лучи
γ-лучи
4H → He

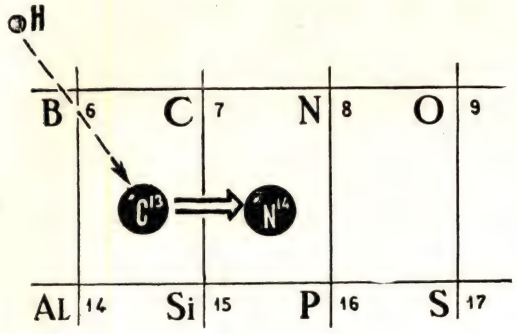


Рис. 14.

большим атомным весом (рис. 14). На этот раз это будет ядро атома азота N^{14}, который составляет почти всю массу земного атмосферного азота.

Какие бы элементы ни существовали и ни возникали вновь в цепи ядернохимических превращений, на Солнце их судьба предопределена. Им придется снова и снова участвовать в протонных превращениях. Они могут сталкиваться почти только с протонами: ведь на Солнце больше всего водорода.

При слиянии ядер азота N^{14} и водорода, согласно правилу сдвига в периодической системе, должно возникнуть ядро легкого кислорода O^{15} (рис. 15). Этого изотопа на Земле нет, но физики умеют его получать. Он радиоактивен и исчезает за короткое время. За две минуты распадается половина его атомов. При распаде он испускает позитрон и снова, уже

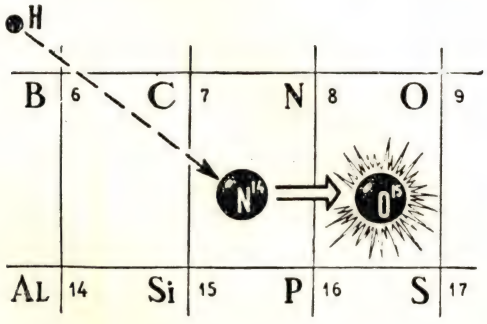


Рис. 15.

в третий раз, превращается в азот, но на этот раз в тяжелый изотоп азота N^{15} (рис. 16). Это стабильный изотоп азота, он присутствует в небольших количествах в нашем обычном азоте.

При внедрении протона ядро N^{15} сразу распадается, выбрасывая α-частицу—ядро атома гелия,— и превращается... в ядро самого обычного изотопа углерода — C^{12} (рис. 17). Атомное ядро углерода C^{12} в результате четырех последовательных ядерных реакций с протонами, трижды превратившись в азот, один раз в кислород, один раз в тяжелый углерод, выбросив по дороге два позитрона и одну α-частицу, превращается снова в тот же самый изотоп углерода — C^{12}. В результате углерод остался таким же, каким он и был. Но исчезли четыре водородных ядра и образовалось ядро атома гелия.

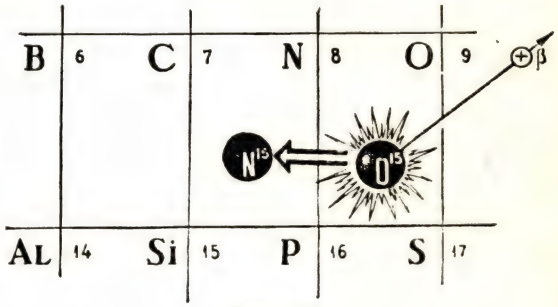


Рис. 16.

На Солнце ядро углеродного атома является той основой, на которой из четырех последовательно присоединяющихся протонов формируется ядро атома гелия. Это и является конечным итогом солнечного процесса. Можно, пожалуй, сказать, что топливом Солнца служит водород, а золой, отбросом — гелий.

Долго, невообразимо долго тянется описанный цикл: должно пройти почти пять миллионов лет, пока атом углерода после всех последовательных превращений станет снова атомом углерода. Это происходит потому, что не каждое столкновение с протоном ведет к реакции. Требуются миллионы лет, чтобы среди бесчисленного множества столкновений с протонами, которые испытывают ядра углерода, произошло столкновение с таким быстрым протоном, кото-

Таблица 40. Глубоко в недрах Солнца, где температура достигает двадцати миллионов градусов, протекают ядернохимические реакции между водородом (протонами) и углеродом, азотом и кислородом. Цикл этих реакций с указанием сдвигов элементов в периодической системе изображен на таблице. Этот цикл — замкнутый. Результатом его является образование атома гелия из четырех атомов водорода. При этом выделяется энергия Солнца.

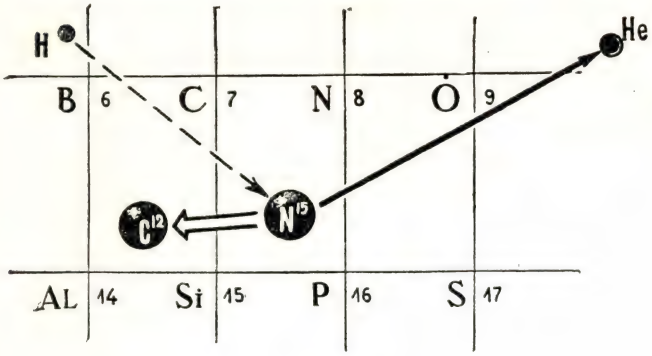


Рис. 17

рый способен проникнуть в маленькую неприступную крепость — атомное ядро.

С такой скоростью (за пять миллионов лет одно полное превращение!) эти реакции могут идти только при огромных температурах, не ниже 20 миллионов градусов. Но температура поверхности Солнца не превышает 6000°. Это означает, что тайна Солнца скрыта в его центральных областях, где, как предполагают ученые, царят чудовищно высокие температуры, близкие к 20 миллионам градусов.

Не нужно думать, что все только что изложенное — это лишь предположение.

Все стадии этого великого солнечного ядернохимического процесса физики уже повторили в своих лабораториях. В ускорителях они смогли получить ядра водорода — протоны с такими большими энергиями, которые превышают их возможную энергию при 20 миллионах градусов на Солнце. Ученым — специалистам по ядерной химии не нужно ждать миллионы лет, чтобы осуществить даже самую медленную стадию из этого цикла.

Спектроскописты сумели определить, сколько углерода на Солнце. Они измерили, сколько в нем тяжелого изотопа C^{13}. Физики рассчитали скорость этой реакции, нашли, сколько энергии выделяется при каждом полном цикле, происходящем с одним атомом, и оказалось, что при 20 миллионах градусов и при том количестве углерода C^{13}, какое найдено на Солнце, должно образовываться именно столько энергии, сколько Солнце ее испускает. О том, как физики подсчитали, сколько энергии образуется при реакции синтеза гелия из водорода, вы можете прочесть в статье «Термоядерные реакции в природе и технике».

Теплые, ласковые лучи солнышка, в которых вы греетесь и загораете летом, рассказали много чудесного о тайнах загадочных процессов, протекающих за миллионы километров от нашей Земли. Но еще не все понятно, не все изучено. Многое и многое остается на вашу долю, будущие ученые — юные читатели Детской энциклопедии.

МЕЖЗВЕЗДНОЕ ПРОСТРАНСТВО

Трудно предсказать пути развития науки. Даже самый гениальный ученый, сумевший обобщить опыт многих поколений своих предшественников в единой великой идее, в большом открытии, не в состоянии предугадать дальнейшую его судьбу. Наука развивается часто по таким сложным и извилистым дорогам, что даже трудно бывает проследить и понять возможную связь и преемственность в непрерывной цепи ее великих достижений.

В глухие и страшные годы фашистской оккупации в маленьком городке Лейдене, в Голландии, на собрании подпольного научного кружка юный студент Ван де Хулст сделал замечательный доклад.

Исходя из теории строения атома, которая, как мы уже знаем, была развита наукой на основе периодического закона Менделеева, он рассчитал, какова должна быть самая длинная волна, возможная в спектре излучения водорода. По его расчету оказалось, что такая волна должна иметь длину 21 *см*. Она должна лежать в области коротких радиоволн. Он рассчитал, какова должна быть вероятность того, что атом водорода будет излучать такие волны. Оказалось, что совершенно безнадежно надеяться обнаружить это радиоизлучение на Земле. Нужно ждать много миллионов лет, чтобы в атоме водорода осуществились такие перемещения электронов, которые сопровождались бы излучением радиоволн длиной в 21 *см*.

В отличие от хорошо изученного видимого спектра, излучаемого раскаленным водородом, его радиоизлучение должно происходить при низких температурах. В этом своем докладе молодой ученый сделал совершенно замечательное предположение.

Он сказал, что хотя на Земле и нельзя обнаружить длинноволновое водородное излучение, но если в бесконечности мироздания, в безграничном межзвездном пространстве присутствует водород, можно надеяться обнаружить его излучение на волне 21 *см*. Это было одно из тех блестящих предсказаний, которые, являясь торжеством человеческой мысли, кладут начало новой эпохе в науке.

Это предсказание оправдалось. Оказалось, что из необъятных глубин Вселенной к нам на Землю всегда, не прекращаясь ни ночью, ни днем, приходят на волне 21 *см* поразительные радиосообщения о тайнах мироздания, которые, как невидимый диктор, рассказывает нам межзвездный водород.

Волна в 21 *см* мчится к нашей планете из столь отдаленных уголков мироздания, что требуются тысячи и миллионы лет, пока она дойдет до антенн радиотелескопов. Она рассказывает нам, что в мироздании существуют невидимые глазу облака водорода, чудовищные по своим размерам, простирающиеся через бесконечные просторы Вселенной от одной звездной системы к другой. Можно даже определить протяженность и форму этих скоплений водорода. Для волны 21 *см* в мировом пространстве нет преград. Даже черные, непроницаемые облака пыли, скрывающие от взора исследователя огромные области Млечного Пути, совершенно проницаемы для холодного излучения водорода. И эти волны помогают ученым, изучающим тайны превращения вещества, понять природу вещества, из которого построены далекие звезды не только нашей звездной системы — Млечного Пути, но и самых отдаленных туманностей, лежащих на самом краю видимой части Вселенной. И необъятные звездные миры, разобщенные чудовищными расстояниями в пустом безграничном пространстве, теперь оказываются связанными в единое целое гигантскими водородными облаками.

Иногда бывает трудно проследить преемственность развития идей, но, несомненно, есть прямая и непрерывная связь между смелым и замечательным предсказанием юного голландского студента и составившей эпоху в науке идеей Менделеева.

ХИМИЯ ЗВЕЗД

Химия Солнца, с которой мы только что познакомились,—это только страничка из пока еще таинственной и загадочной, не прочтенной наукой книги о ядерной химии звезд.

Солнце — это звезда. В течение миллиардов лет оно испускает во все концы Вселенной огромные потоки энергии, которые согревают по дороге и нашу планету. И это только за счет запасов водорода, превращающегося на Солнце в гелий.

Странная и особая роль у водорода в мироздании. Миллионы звезд, похожих на Солнце, получают свою энергию за счет синтеза гелия из протонов. На многих звездах, так же как и на нашем Солнце и во всем космическом пространстве, обнаружены огромные запасы водорода, преобладающего в составе этих звезд над всеми остальными элементами.

Водород, образующий звезды, занимает и межзвездные пространства, где он находится в состоянии холодного бесконечно разреженного газа.

Какова же общая судьба водорода во Вселенной?

Мы пока знаем только процесс уничтожения водорода при превращении его в более тяжелые атомы гелия. Но, вероятно, и на Солнце, и на многих и многих звездах синтез тяжелых элементов на этом не заканчивается. Наверное, и сам гелий вступает в реакцию, образуя более тяжелые элементы. Недаром мы находим всюду и на нашей Земле, и в метеоритах, и на Солнце значительное преобладание четных элементов, атомные веса которых делятся на четыре, что заставляет думать, что эти самые прочные, самые устойчивые в мироздании элементы построены из ядер гелия с атомным весом 4.

Астрономы определили размеры солнечного шара и сумели определить его массу — «взвесить» его. Физики изучили его состав и определили, сколько на Солнце водорода. Ядерная химия дала возможность измерить скорость «сгорания» водорода.

На основании этого подсчитали, на сколько времени хватит водорода на Солнце. Оказалось, что в течение очень большого периода времени Солнце будет оставаться Солнцем. Больше чем на двадцать миллиардов лет хватит запасов ядерного горючего на нашем Солнце.

Но все же в бесчисленном множестве звездных миров происходит непрерывное уничтожение водорода, и общие запасы его в мироздании убывают. И многие ученые на Западе на этом основании пришли к тяжелому и мрачному выводу о «водородной смерти» Вселенной. Они считают, что в безграничных просторах Вселенной одна за другой гаснут звезды, исчерпавшие свои запасы водорода. И эти, ранее ярко сиявшие светила одно за другим превращаются в холодные, мертвые миры, которым суждено вечно нестись в космическом пространстве.

В древней китайской энциклопедии, составленной астрономом Ма Туан-лином, есть очень интересная и важная запись о том, как более девятисот лет назад, в 1054 г., китайские ученые наблюдали внезапно вспыхнувшую на небе в созвездии Тельца удивительную звезду. Она сияла таким светом, что его можно было срав-

нить со светом Луны. Китайские астрономы описали эту звезду и очень точно определили ее место на небесном своде.

В наше время точно на этом же самом месте небесного свода астрономы нашли небольшую туманность, за свою странную форму получившую название Крабовидной. А совсем в последние годы было обнаружено, что Крабовидная туманность является очень мощным источником радиоизлучения, похожего на радиоизлучение межзвездного водорода.

Внимательное изучение туманности в созвездии Тельца показало, что она расширяется во все стороны. По скорости этого расширения оказалось возможным установить, что эта туманность возникла 900 с лишним лет назад — точно в тот момент, когда древние китайские астрономы заметили появление «сверхновой» звезды на небе.

Они очень внимательно наблюдали за ней. Каждый день они следили за ее блеском, сравнивая его с блеском соседних звезд. Яркость этой звезды постепенно меркла; наконец, звезда совсем перестала быть заметной. На ее месте осталась лишь чуть заметная туманность.

Вопрос о появлении сверхновых звезд в мироздании исключительно важен. Но за последние столетия, прошедшие после изобретения телескопа, сверхновые звезды на небе не наблюдались. Поэтому в 1954 г. Академия наук СССР обратилась к Китайской Академии наук с просьбой внимательно изучить древние летописи Китая и установить, не наблюдались ли еще такие же внезапные появления новых сверхъярких звезд на небе. К удивлению астрономов оказалось, что появление этих загадочных звезд не такая уж большая редкость. Вот, например, какая запись была найдена в древней китайской летописи: «В период Чжун Пина, во второй год, в 10-ю луну, в день Квей Хаэ (2 октября 185 г. н.э.) появилась звезда — Гостья посредине Нан Мана (созвездие Центавра). Она была величиной с бамбуковую циновку, и у нее было пять цветов. Постепенно она уменьшала свой блеск к 6-й луне следующего года (т. е. к июлю 186 г.), когда она исчезла».

И в этом месте, где более 1700 лет назад вспыхнула сверхновая звезда, астрономы в наши дни нашли также мощный источник космического радиоизлучения — «радиозвезду». Сопоставляя на основании летописных записей древних астрономов число катастрофических взрывов — появлений сверхновых звезд в ближайших окрестностях нашего Солнца с размерами всей нашей Галактики, астрономы пришли к очень важному выводу: сверхновые звезды в нашей Галактике появляются в среднем каждые пятьдесят лет. Скорость их исчезновения такова, что яркость их снижается вдвое приблизительно за пятьдесят дней.

Что же при этом происходит в Космосе? Какие загадочные процессы в недрах звезды приводят к гигантским катастрофам, подобным той катастрофе, которая разметала звезду в созвездии Тельца в 1054 г. и превратила ее в чудовищную по размерам и фантастическую по очертаниям Крабовидную туманность? Истинные размеры этой туманности в наши дни невообразимо колоссальны — она уже простирается на сотни триллионов километров.

Что же за таинственный процесс начинается в звездах, дающих начало сверхновым?

Этот процесс не может быть той «мирной» ядернохимической реакцией, которая протекает на нашем Солнце,— реакцией образования гелия из водорода.

К образованию сверхновых звезд может приводить, очевидно, какая-то пока совершенно неизвестная реакция, ведущая к внезапному взрыву, к страшной космической катастрофе. Что это за реакция, наука пока не знает.

Но вот, изучая изотопный состав новых элементов, не существовавших на Земле и заново созданных человеком, ученые обнаружили среди изотопов нового зауранового элемента — калифорния, занимающего 98-е место в периодической системе Менделеева, изотоп с атомным весом 254, период полураспада которого оказался равным 55 суткам.

В науке возникла догадка, которая связывает тайну сверхновых звезд с новым элементом калифорнием: при таинственной реакции, начавшейся в недрах звезды и ведущей к синтезу тяжелых элементов с преобладанием калифорния, внезапно выделяется чудовищное количество энергии, ведущее к взрыву. Уменьшение яркости сверхновой звезды определяется скоростью распада калифорния.

Калифорний — тяжелый радиоактивный элемент, он быстро распадается. Его не могло быть в звезде до катастрофы, приведшей к взрыву. Он возникает во время ядерной реакции, которая приводит к синтезу тяжелого калифорния, лежащего за пределами периодической таблицы элементов земного шара, ограниченной ураном. При этом, конечно, должны возникать и все остальные, более легкие, чем калифорний, элементы, в том числе и сам уран.

Мы не знаем, что произошло с веществом звезды во время взрыва. У нас нет возможности

определить состав вещества Крабовидной туманности. Мы еще не научились понимать радиосигналы, посылаемые таинственными процессами в этой туманности. Но нет сомнения в том, что они будут разгаданы, и, может быть, именно этим путем наука раскроет одну из величайших тайн нашей Вселенной — «водородную тайну». Мы тогда узнаем и загадку запасов водорода в звездах и мировом пространстве и расшифруем процессы, ведущие к его образованию и к образованию «молодых» водородных звезд. Мрачный вывод о «водородной смерти» Вселенной, логически порочный и неверный, опровергается опытными фактами, достижениями науки наших дней, первыми краеугольными камнями в основании одной из великих наук будущего — химии Вселенной.

У этой науки будущего много задач. Но эти задачи едины — все они сводятся к разгадке тайн вещества, единого во всей Вселенной.

Могучим орудием познания мира, основой для развития науки будущего еще надолго останется великий периодический закон Менделеева. Но не нужно думать, что он навсегда может остаться застывшим и неизменным. Нет, он и сам будет развиваться, включая в себя все большее и большее содержание, все глубже и точнее отражая истину законов природы.

С его помощью будет окончательно раскрыта великая тайна образования всех элементов во Вселенной. Эволюция — развитие вещества, образование одних элементов из других — неразрывно связана с эволюцией звезд в мироздании.

Мы знаем о великом синтезе гелия из водорода на Солнце. Но мы не знаем, где и как образуются тяжелые элементы, например уран или торий. Быть может, это происходит в новых звездах во время страшных космических катастроф. Быть может, это происходит и в загадочных белых карликах — горячих, малых по размерам звездах с чудовищной плотностью.

Вещество белых карликов в десятки тысяч раз плотнее, чем на Земле. Наверное, электронные оболочки атомов у всех элементов периодической системы на этих звездах разрушены, и белые карлики построены из свободных атомных ядер и свободных, несвязанных электронов.

Не ясен вопрос и об относительной устойчивости элементов в мироздании, определяющей как состав земного шара, так и состав всех остальных небесных тел Вселенной. Этот вопрос, может быть, будет решен с помощью нового зарождающегося в наши дни периодического закона строения атомных ядер.

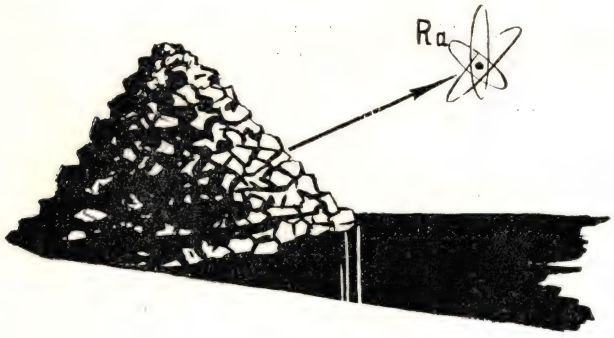
Очень много работы вам предстоит, молодые наследники великого Менделеева!

КАК ОПОЗНАЮТСЯ ХИМИЧЕСКИЕ ЭЛЕМЕНТЫ

ХИМИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ — ВАЖНЫЙ РАЗДЕЛ ХИМИИ

В истории каждого химического элемента, как в биографии каждого человека, существуют знаменательные даты, определяющие всю его дальнейшую судьбу. Особо знаменательной датой является открытие элемента в природе. Может случиться, как это было, например, с галлием, что существование элемента уже предугадано, заранее предопределены его важнейшие свойства. И все же никто не может заранее знать, что сулит вновь открытый химический элемент человеческой практике. Когда творцы спектрального анализа Кирхгоф и Бунзен открыли с его помощью два новых щелочных металла — рубидий и цезий,— никому и не грезились заводы, совершенно безлюдные и тем не менее работающие на полную мощность. Управление, пуск и остановку агрегатов, изменение рабочего режима вплоть до контроля за качеством продукции здесь за человека выполняют «умные» приборы-автоматы, к числу которых относятся и автоматы, наделенные органами зрения. «Глаза» таких автоматов — фотоэлементы. А незаменимыми материалами для светочувствительного слоя, «сетчатки» этих электрических глаз, оказались именно рубидий и цезий, очень редкие щелочные металлы, превосходящие светочувствительностью все другие известные вещества.

Химические элементы открываются в природе с помощью химического анализа. Выделение их в свободном виде из природных источников — задача того же самого химического анализа. Химический анализ сопровождает каждый шаг в изучении химических элементов и всех вновь получающихся соединений.



Из тонны никому не нужных отходов... наконец получена одна десятая грамма соли радия.

Химический анализ — это наука, но вместе с тем это и искусство, строгое и точное. И, как всякое подлинное искусство, оно требует от человека громадного труда, настойчивости и терпения.

Когда Кюри-Склодовская обнаружила, что урановая руда обладает более сильной радиоактивностью, чем выделенный из нее уран, она заподозрила присутствие в руде других, еще более радиоактивных элементов.

Это была гипотеза. Она могла быть подтверждена лишь одним-единственным способом — путем выделения из урановой руды предполагаемого химического элемента средствами химического анализа. На это ушли многие месяцы непрерывного и невероятно однообразного труда: изо дня в день растворение, осаждение, фильтрование, кристаллизация, и каждый раз — испытание получившихся кристаллов на радиоактивность. Нерадиоактивные продукты отбрасывались, а с радиоактивными начиналось то же самое: растворение, осаждение, фильтрование, кристаллизация... От тонны никому не нужных остатков урановой руды оставались сначала килограммы, затем граммы, сантиграммы... Но, наконец, настал счастливый день. В руках исследователя была одна десятая грамма ничем не примечательного по виду белого порошка — хлористой соли радия. Не только в химии, но и в физике это торжество химического анализа открыло новую главу. Таково было начало пути, который последовательно, открытие за открытием, привел науку к освобождению внутриядерной энергии и искусственному получению химических элементов. И на всем протяжении этого пути неизменным спутником и помощником исследователей был все тот же химический анализ.

Без химического анализа не было бы химии. Более того, без него не могли бы плодотворно развиваться и все другие отрасли науки и практики, имеющие дело с веществами, — металлургия и машиностроение, геология и горное дело. К помощи химического анализа обращается и археолог, раскрывая секреты своих находок, и искусствовед, устанавливая подлинность старинных картин. К химическому анализу прибегает следователь при изучении вещественных доказательств преступления (к его услугам специальная система химического анализа — судебная химия). Агроном при составлении почвенной карты своего района и планировании сева пользуется данными химического анализа почвы и агрохимии — науки, родившейся из химических анализов почв и растений.

КАК ВОЗНИКЛА АГРОХИМИЯ

Едва успев окончить в Париже горный институт, молодой ученый Буссенго отправился в Южную Америку сражаться под знаменами Боливара (его имя сейчас носит одна из латиноамериканских стран — Боливия) в освободительной войне против испанского владычества. Участвуя в походах, Буссенго находил время изучать природные богатства страны. Он раскидывал свою походную аналитическую лабораторию всюду, куда его забрасывала война. Особое внимание исследователя привлекло одно интересное явление: богатые урожаи, собираемые в Америке с совершенно бесплодных пес-

Искусствоведы устанавливают подлинность старинной картины с помощью химического анализа.

Влияние удобрений на рост и развитие растений: на участке А внесены удобрения; участок Б без удобрений.

ков после внесения в них птичьего помета — гуано. Буссенго произвел химический анализ гуано и обнаружил в нем высокое содержание связанного азота. Эти анализы Буссенго и были не чем иным, как рождением агрохимии.

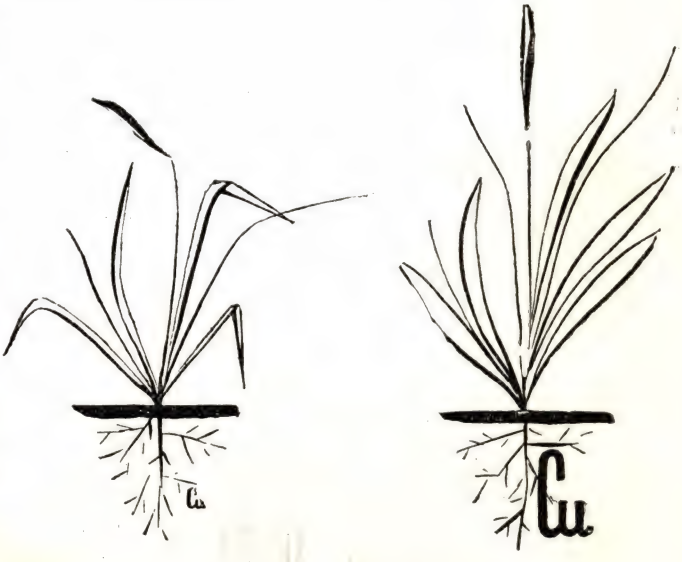
Кому же теперь не известно, что самые бесплодные почвы становятся плодородными после внесения в них азотных, фосфорных и калийных удобрений?

Но растения нуждаются не только в азоте, фосфоре и калии. Химическим анализом сначала в организме животных, а затем в растениях была обнаружена медь. Это открытие потребовало бо́льшего искусства, чем открытие в организмах азота, так как в одном килограмме растительной массы содержится меди не больше, чем в медной булавочной головке. Это побудило изучать роль меди в сложном «химическом хозяйстве» живых организмов. Оказалось, что медь попадает в растения из почвы не случайно. Хотя ее содержание в растениях и животных незначительно, медь не менее необходима для нормального роста и развития растений и животных, чем азот или фосфор.

В почве содержится очень мало меди. Если же почва особенно бедна медью, растения заболевают и чахнут. Такими особенно бедными медью почвами, как обнаружил химический анализ, являются торфяные и заболоченные почвы. С них можно снимать урожай, лишь подкармливая растения медными удобрениями. Так химический анализ помогает совхозам и колхозам осваивать миллионы гектаров новых земель, казалось, навсегда потерянных для земледелия.

Химические элементы, необходимые или полезные для растений и животных в малых количествах, называются м и к р о э л е м е н т а м и. К микроэлементам, кроме меди, относятся бор, марганец, цинк, кобальт, молибден. Если химическим анализом устанавливается, что в почве не хватает того или иного микроэлемента, он вносится в нее в виде микроудобрения. Микроэлементы влияют и на качество урожая. Так, марганец и бор повышают сахаристость сахарной свеклы; тот же бор и другие микроэлементы влияют на содержание жира в плодах сои, семенах подсолнечника и льна.

Недостаточное содержание микроэлементов в почве отражается и на животных, вызывая различные заболевания. Но растения и животные могут заболевать не только от недостатка, а и от избытка микроэлементов. На почвах с повышенным содержанием очень редкого элемента селена растения развиваются нормально, но селен, попадая в растительные белки, частично замещает в них серу. Для скота такие растения становятся ядовитыми. Районы, в которых распространено массовое заболевание растений, животных или людей из-за недостатка или избытка в почвах того или иного микроэлемента, называются биогеохимическими провинциями. Такими провинциями изобилует Латвийская ССР. Это причиняло большие убытки животноводству республики, пока латвийские ученые средствами химического анализа не вскрыли причины заболевания животных. Было обнаружено, что в почве недостает кобальта. Практикам сельского хозяйства осталось только восполнить эту недостачу.



Рост растений: слева — на почвах, бедных медью; справа — на почвах с нормальным содержанием меди.

Агрохимическая карта района помогает правильно размещать сельскохозяйственные культуры.

Почва влияет на урожай не только через доставляемые растению «строительные материалы». На одной и той же почве в зависимости от степени ее кислотности один вид растений может давать высокий урожай, а другие будут хиреть. На рисунке вы видите карту почв района, составленную школьным агрохимическим кружком. Числа на карте — это водородный показатель почвы pH — условная мера ее кислотности: чем кислотность выше, тем меньше pH. Если растение обеспечено всеми необходимыми «строительными материалами», урожайность зависит от pH. Так, на сильно кислых почвах (с pH от 5 до 5,5) ростки ячменя не развиваются, а картофель именно в этих условиях дает наибольший урожай.

Определение водородного показателя в агрохимическом анализе производится с помощью индикаторов. Индикаторами является большинство пигментов, придающих лепесткам цветков их разнообразную окраску (кроме желтых). Так, изменение окраски цветов медуницы, повсеместно зацветающей ранней весной, из красной в фиолетовую, а затем в голубую вызывается изменением окраски пигмента-индикатора в связи с изменением кислотности клеточного сока с возрастом цветка. Индикаторами являются и многие красители, которыми красят материю, бумагу, полы. Этим и объясняется появление на одежде и обложках тетрадей цветных пятен при попадании капель кислоты. Пятна эти исчезают при нейтрализации нашатырным спиртом.

Изменение окраски каждого индикатора происходит в определенном интервале значений pH. Так, общеизвестный лакмус имеет синюю окраску в щелочных средах и красную — в кислых. Переход красной окраски лакмуса в синюю через фиолетовую начинается при pH, равном 6, и кончается при pH, равном 8. Сравнивая на глаз оттенок окраски лакмуса в испытуемом растворе с окраской лакмуса в заранее приготовленных растворах с известными значениями pH, можно определить pH почвенного раствора. Для определения pH более кислых растворов обращаются к другим индикаторам, например метилоранжу, переход которого из розовой окраски в желтую происходит в другом интервале значений pH — между 3 и 5 (см. цв. табл. на стр. 624).

ХИМИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ НА ХИМИЧЕСКИХ ПРОИЗВОДСТВАХ

Наиболее прямое и непосредственное отношение химический анализ имеет к поискам полезных ископаемых и к их обработке на химических и металлургических заводах.

Предметом первой необходимости всех геологов при поисках полезных ископаемых является походная химическая лаборатория при помощи которой они могут сделать на месте простейший химический анализ найденного минерала. Непременным отделом любого химического, металлургического, силикатного или нефтеперерабатывающего завода является химическая лаборатория. Лаборатория зорко следит за тем, чтобы на завод поступало доброка-

чественное сырье, чтобы строго, «по расписанию» и нормам шла его переработка, чтобы продукты этой переработки отвечали государственным стандартам.

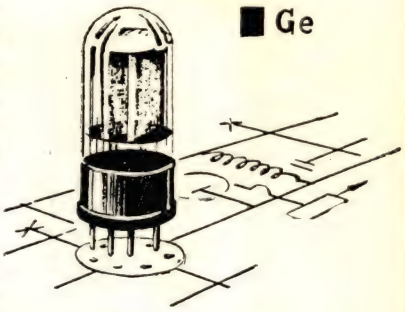
Работники лаборатории стремятся к тому, чтобы было как можно меньше неиспользуемых отходов производства. Химическая лаборатория — это строгий судья и советчик любого технологического процесса.

На одном из уральских заводов в течение многих лет из цинковой руды выплавляли цинк. Руда, поступавшая на завод, анализировалась только на содержание цинка.

Около завода в огромных количествах скопились отходы. Химическая лаборатория завода решила узнать, какие же элементы содержатся в них. Оказалось, что наряду с распространенными элементами в отходы попадает редкий и дорогой металл галлий, килограмм которого стоит несколько десятков тысяч рублей. Завод перестроили и стали выделять из руды не только цинк, но и галлий.

Физики обнаружили, что один из редких металлов — германий — является полупроводником. Полупроводники нашли сейчас широкое применение: небольшая пластинка германия объемом в несколько кубических миллиметров может заменять в радиоприемнике и телевизоре радиолампу.

Но германия в природе чрезвычайно мало, и он не образует рудных месторождений. Химики-аналитики получили задание отыскать природные материалы, из которых можно было бы выделить германий. Было проанализировано много природных минералов и отходов различных производств. Оказалось, что германий содержится в золе донбасских углей и в пыли, оседающей в очистительных системах на коксогазовых заводах.



Пластинка германия в несколько кубических миллиметров заменяет в радиоприемнике и телевизоре радиолампу.

Химические лаборатории сейчас имеются при всех заводах, во многих институтах и предприятиях. Одна из главных задач этих лабораторий — это производство анализов. Прежде чем использовать какое-либо сырье, его подвергают химическому анализу и дают оценку различным свойствам материала. Анализу подвергаются и готовые продукты химической промышленности.

Геологи простейшими химическими способами определяют состав минералов.

АНАЛИЗ «НА ПЛАМЯ»

Во многих городах Советского Союза в дни торжественных праздников устраивается салют. Гремят выстрелы, и в небо с шипением взлетают ракеты, рассыпающиеся разноцветными искрами — красными, желтыми, зелеными. Человек, знакомый с химией, легко ответит на вопрос о причинах яркой окраски праздничных огней. Он скажет, что красная окраска получена добавлением к пороху солей стронция, желтая — солей натрия, зеленая — солей бария и т. д. (см. цв. табл. на стр. 625).

Определение химических элементов по окраске пламени является простейшим методом химического анализа. Чтобы составить представление об этом методе, вы можете воспользоваться простой железной проволочкой. Проволочку смачивают раствором исследуемой соли и вносят в край горелки, несколько ниже его середины. Пламя сразу же окрашивается в соответствующий цвет.

СПЕКТРАЛЬНЫЙ АНАЛИЗ

Внесите в язычок пламени газовой горелки или в пламя спиртовой горелки кончик папиросы, и пламя тотчас окрасится в светло-сиреневый цвет: это обнаружил себя калий, извлеченный когда-то из почвы корешками табака. Если в анализируемом веществе присутствуют и калий и натрий, то натрий вы откроете описанным

В химической лаборатории.

способом, а калий — нет. Желтая окраска, сообщаемая пламени солями натрия, так интенсивна, что она замаскирует окраску пламени калием. Впрочем, калий все-таки можно открыть реакцией «на пламя», если у вас найдется густо-синее стекло (его может заменить пробирка с раствором фиолетовых чернил). Это стекло не пропустит желтых лучей натрия, но позволит обнаружить по сиреневой окраске пламени присутствие калия.

Но существует прибор, полностью устраняющий подобные помехи. Это спектроскоп. Он позволяет открывать химические элементы по окраске пламени, сколько бы этих элементов ни содержалось в анализируемой смеси. Взглянув в спектроскоп, мы видим вместо колеблющегося язычка пламени темное поле, пересеченное яркими тонкими линиями (см. цв. табл. на стр. 625). Из них особенно выделяется в середине спектра двойная желтая линия, принадлежащая натрию. Ближе к фиолетовому концу спектра мерцает целая группа более слабых линий — голубых и фиолетовых, они принадлежат калию. Свет, посылаемый в наш глаз пламенем спиртовой лампочки, спектроскоп разложил на отдельные лучи. Теперь не представляет особого труда расшифровать спектр, т. е. разобраться в том, какому химическому элементу принадлежит каждая линия. Для этого цветные линии сравнивают с «атласом спектральных линий»— своего рода описью всех изученных спектров элементов.

Итак, в спектре пламени против определенного деления спектроскопической шкалы появляются спектральные линии элементов, содержащихся в смеси. По окраске, сообщаемой пламени, иногда можно спутать элементы, скажем стронций с кальцием (оба окрашивают пламя в красный цвет). Но спектры их содержат разное число линий, которые размещены поразному.

Теперь вы легко представите себе переживания химика Лекока де Буабодрана, когда среди других хорошо знакомых ему линий он в 1875 г. разглядел в спектре цинковой обманки чуть заметную линию, которая заведомо не принадлежала ни одному из числа известных в то время химических элементов. Эту линию спектра давал какой-то новый элемент. Буабодран выделил его и назвал галлием.

Галлий — не единственный химический элемент, открытый с помощью спектрального анализа. Задолго до него, почти в одно и то же время и таким же способом были открыты рубидий и цезий, индий и таллий. Свои названия эти четыре элемента получили по окраске наиболее бросающихся в глаза линий в их спектрах: голубой у цезия (от «цезиус» — небесно-голубой), двух красных у рубидия (от «рубидус» — ярко-красный), зеленой у таллия от «таллос» — зеленая ветка) и синей у индия (от «индиго» — синяя краска).

Но поистине триумфом спектрального анализа было открытие в спектре солнечного протуберанца нового химического элемента — гелия (об этом подробно рассказано на стр. 588). А двадцать семь лет спустя тот же гелий был повторно открыт на Земле.

Незадолго до открытия гелия на Солнце французский философ-идеалист Огюст Конт, стремясь доказать бессилие человеческого разума, объявил, что человек никогда не узнает, например, химического состава небесных светил. Спектральный анализ, сделал «невозможное» возможным. Более того, определять с его помощью состав далеких небесных светил оказалось не труднее, чем анализировать то, что мы можем взять в руки.

Спектральный анализ отличается необыкновенной чувствительностью. Желтая линия

натрия, например, на мгновение вспыхивает в спектре пламени, когда в него вводится всего десятимиллионная доля миллиграмма натрия. Мы еще только мечтаем об аналитических весах, на которых можно было бы взвесить такое малое количество вещества. Спектральный анализ характеризуется также быстротой. Существуют спектральные приборы — они называются квантометрами,— автоматически выдающие спустя всего 2—3 мин. готовый количественный анализ помещенного в них образца, содержащего десятки химических элементов. При спектральном анализе расходуется совсем незначительное количество анализируемого вещества, что позволяет исследовать даже готовые металлические детали, не причиняя им никакого вреда.

С помощью спектрального анализа решаются самые разнообразные производственные задачи: от сортировки сплавов в заготовительных цехах до проверки сорта металла в уже готовых изделиях. При помощи спектрального анализа регистрируются ничтожные доли примесей (до 0,000001%) в особо чистых материалах для техники полупроводников.

Особенно же широкое применение спектральный анализ нашел в сталелитейной промышленности. Перенесемся в мартеновский цех. В огромных пролетах выстроились в ряд огнедышащие печи. Здесь очень просторно, и кажется, что работа идет медленно. По обе стороны от печей проложены рельсы. С одной стороны по ним медленно шествуют завалочные машины с длинными подвижными «руками». Вот открылся пылающий зев печи, от машины протянулась «рука», подхватила стоящий у печи стальной ящик-мульду, проворно сунула его в печь и опрокинула там, высыпав содержимое. По другую сторону на многочисленных путях стоят готовые принять металл формы-изложницы. Высоко под потолком краны плавно несут многотонные ковши.

В печах, где варится сталь, гудит пламя, на поверхности металла кипит и плещет шлак. Непосвященному человеку кажется, что ничего нельзя разобрать в этом пекле. Но строго и внимательно следят за работой печи сталевары. Через каждый 15—20 мин. из печи берут стальной ложкой на длинной ручке пробу, и экспресс-лаборатория производит спектральный анализ содержимого. В зависимости от того, что показал анализ, мастер изменяет температурный режим печи — уменьшает или увеличивает подачу топлива — или приказывает добавить в печь известь, марганец и другие компоненты, необходимые в данный момент для правильного хода процесса.

На многих заводах нашей страны до 70 — 80% всех анализов металла проводится методами спектрального анализа.

АНАЛИЗ «НА ПЕРЛ»

Присутствие некоторых химических элементов можно определить не только по окраске пламени, но и по окраске, сообщаемой ими прозрачному стеклу (см. цв. табл. на стр. 624). Зеленоватый цвет простого оконного стекла объясняется присутствием в его составе двухвалентного железа. Окраска цветных стекол настолько характерна, что по ней можно легко определить, какие вещества применяли при изготовлении этих стекол сотни лет назад. Так, рассматривая мозаику «Полтавская битва», созданную М. В. Ломоносовым, можно утверждать, что для окраски стекол он применял соединения кобальта, меди, железа, никеля, хрома и других элементов. Вот какие окраски сообщают стеклу различные элементы:

Элемент	Окраска	Элемент	Окраска
Хром	зеленая		
Кобальт	синяя	Ванадий	желто-зеленая
Медь	сине-зеленая	Железо (трехвалентное	желтая
Марганец	фиолетовая	Железо (двухвалентное	светло-зеленая
Никель	красно-коричневая		

Окрашивание стекол соединениями различных химических элементов можно применить и для открытия самих элементов. Для этой цели применяются не обычные силикатные стекла, а бура, дающая при застывании легкоплавкое «борное» стекло, или соль $NaNH_4HPO_4$, образующая «фосфорное» стекло.

Платиновую проволочку, конец которой изогнут в виде небольшой петли, нагревают в пламени горелки и быстро дотрагиваются ею до порошкообразной буры (или борной кислоты, или соли $NaNH_4HPO_4$). Кусочки буры при-

Цветная мозаика «Полтавская битва» создана М. В. Ломоносовым из окрашенных стекол.

плавляются к проволочке. Ее снова нагревают и снова прикасаются к буре, чтобы расплавленная бура заполнила петлю проволочки. Затем конец проволочки опускают в раствор анализируемого вещества и снова расплавляют в пламени горелки. При этом и образуется бусинка окрашенного борного стекла, которая называется п е р л о м. По окраске перла и можно судить о наличии того или иного элемента.

Фосфорный перл окрашивается соединениями меди в непрозрачный красный цвет, а железо эту соль почти не окрашивает. Окраска фосфорного перла другими элементами подобна окраске с бурой.

При отсутствии платиновой проволочки можно воспользоваться нихромовой проволочкой, отломав кусочек ее от спирали электроплитки и намотав свободный конец на деревянную палочку. Но никель и хром, входящие в состав нихрома, сами немного окрашивают перл буры.

Вышеописанные методы открытия элементов относятся к физико-химическим методам анализа, так как в них использовались физические свойства открываемых элементов — окраска пламени и окраска стекол. Существуют и другие физико-химические методы химического анализа, которые нашли применение в практике химических лабораторий.

Однако большинство физико-химических способов требует специальной и иногда довольно сложной аппаратуры. Наиболее доступными и широко распространенными способами определения состава веществ являются чисто химические методы анализа. Эти методы требуют самого неприхотливого оборудования: пробирок, стаканов и воронок.

ХИМИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ «МОКРЫМ ПУТЕМ»

Этот анализ основан на том, что каждый химический элемент способен вступать с определенным реактивом в химическое взаимодействие, сопровождающееся характерными внешними признаками: появлением определенной окраски, выделением газа с характерным запахом или окраской, образованием осадка и т. д.

Однажды в одном из южных городов вспыхнула эпидемия дизентерии. Ее происхождение не поддавалось объяснению, пока не вмешался химический анализ. Город снабжался водой из источников, в которых отсутствовали соли соляной кислоты, т. е. ионы хлора. Между тем водопроводная вода неожиданно стала давать «реакцию на хлор»: при подкислении ее азотной кислотой и добавлении раствора азотнокислого серебра появлялась муть. Известно, что хлор в виде хлористого натрия всегда содержится в канализационных водах. Поэтому возникло предположение, что в подземных переплетениях водопроводной и канализационной сети труб где-то произошло смыкание тех и других и в водопроводную воду ста-

ла попадать сточная вода, кишащая болезнетворными микробами. При проверке предположение оправдалось и осталось лишь устранить источник зла.

Ионы брома и йода с азотнокислым серебром также дают осадок, нерастворимый в кислотах. Поэтому азотнокислое серебро в аналитической химии относится к числу групповых реактивов.

Групповые реактивы в качественном анализе применяются для выявления всех ионов данной группы. Кроме того, с их помощью ионы этой группы отделяются от ионов всех остальных групп. Но, если заранее известно, что в анализируемом веществе может содержаться лишь один вид ионов из числа всех ионов, входящих в данную группу, дело упрощается. Так, если минеральное удобрение представляет собой белое вещество, растворимое в воде, если его раствор при действии раствора азотнокислого серебра дает белый творожистый осадок, если, наконец, этот осадок не исчезает при действии азотной кислоты, то мы имеем дело с хлористым калием. Чтобы окончательно убедиться в этом, остается использовать реакцию калия «на пламя».

Если же водный настой удобрения при действии раствора азотнокислого серебра дает осадок цвета яичного желтка и этот осадок при действии азотной кислоты тотчас растворяется, мы имеем дело с суперфосфатом. Из всех нерастворимых солей серебра такую окраску имеет лишь фосфат серебра, образующийся в этом случае. Прочие же фосфорные удобрения — фосфоритная и костяная мука и преципитат (кроме аммофоса) — сами не растворимы в воде.

Действие группового реактива сходно с действием приманки: одни рыбы на нее идут, а другие нет.

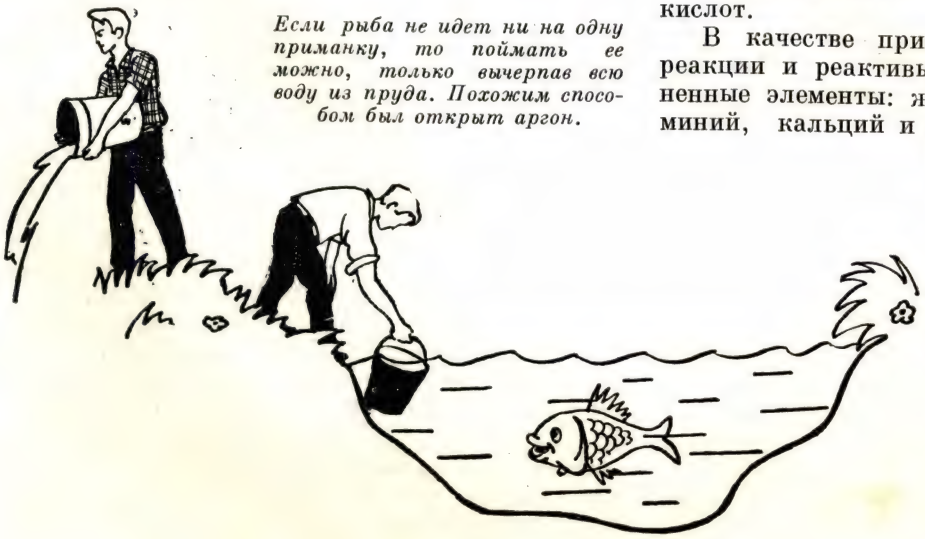
Наряду с групповыми реактивами в аналитической химии используются и индивидуальные реактивы.

Такие реактивы найдены для любых солей и кислот.

В качестве примера приведем некоторые реакции и реактивы на наиболее распространенные элементы: железо, свинец, медь, алюминий, кальций и магний, а также на серную, соляную и азотную кислоты или их соли.

На соли трехвалентного железа имеется два наиболее характерных реактива: железистосинеродистый калий («желтая кровяная соль») и роданистый аммоний.

С первым реактивом растворы солей трехвалентного железа дают нерастворимый в воде осадок темно-синего цвета, назы-



Если рыба не идет ни на одну приманку, то поймать ее можно, только вычерпав всю воду из пруда. Похожим способом был открыт аргон.

ваемый берлинской лазурью. Это вещество известно любому художнику, так как оно служит материалом для изготовления темно-синих красок и обычно входит в набор красок. Эту краску часто так и называют берлинской лазурью.

Хорошим реактивом на соли железа является и роданистый аммоний. С раствором солей трехвалентного железа он образует растворимое вещество характерного кроваво-красного цвета. Служители религиозных культов в прежние времена использовали реакцию трехвалентного железа с роданистым аммонием для «появления крови» на теле человека без каких-либо порезов на нем.

Возьмите, например, 10—15%-ный раствор роданистого аммония и, смочив им вату, протрите руку. Затем проведите по руке тупым ножом, смоченным раствором хлорного (трехвалентного) железа. На руке сразу же появится темно-красная полоска «крови».

Растворы солей свинца, обнаруживаются раствором йодистого калия. При этом выпадает желтый осадок йодистого свинца.

Если этот осадок растворить при нагревании, а затем раствор снова охладить, то из него выпадет йодистый свинец в виде красивых золотисто-желтых блестящих кристалликов, играющих на солнце всеми цветами радуги.

Соли меди открываются при помощи раствора аммиака Если, например, к раствору медного купороса прилить в избытке водный раствор аммиака (известный в обиходе под названием нашатырного спирта), то образуется сложное соединение — аммиакат меди, которое обладает красивой интенсивной лазурно-синей окраской.

Этим методом медь можно обнаружить в присутствии самых разнообразных солей. Смешайте в пробирке растворы солей железа, алюминия, кальция и меди. Прилейте к этому раствору избыток водного раствора аммиака. Затем раствор отфильтруйте от выпавшего осадка. Через фильтр пройдет раствор, окрашенный в лазурно-синий цвет, что указывает на наличие меди.

Алюминий относится к амфотерным металлам, и поэтому его гидроокись хорошо растворяется в щелочах. Если к раствору соли алюминия прилить небольшое количество щелочи, например едкого натра, то выпадет белый осадок гидроокиси алюминия. В избытке щелочи этот осадок растворяется в результате образования соли, называемой алюминатом. В случае едкого натра получится алюминат натрия.

Подобным же образом ведут себя и соли свинца, но их можно легко открыть другими реакциями.

Растворение гидроокиси алюминия в щелочах можно использовать и для отделения этого элемента от других элементов. Для этого к раствору солей алюминия нужно прилить избыток щелочи и осадок различных гидроокисей отфильтровать. Через фильтр пройдет раствор алюмината натрия.

Для открытия алюминия в этом фильтрате нужно добавить к нему твердого хлористого аммония и раствор прокипятить. Если выпадет белый полупрозрачный осадок, это будет указывать на наличие алюминия.

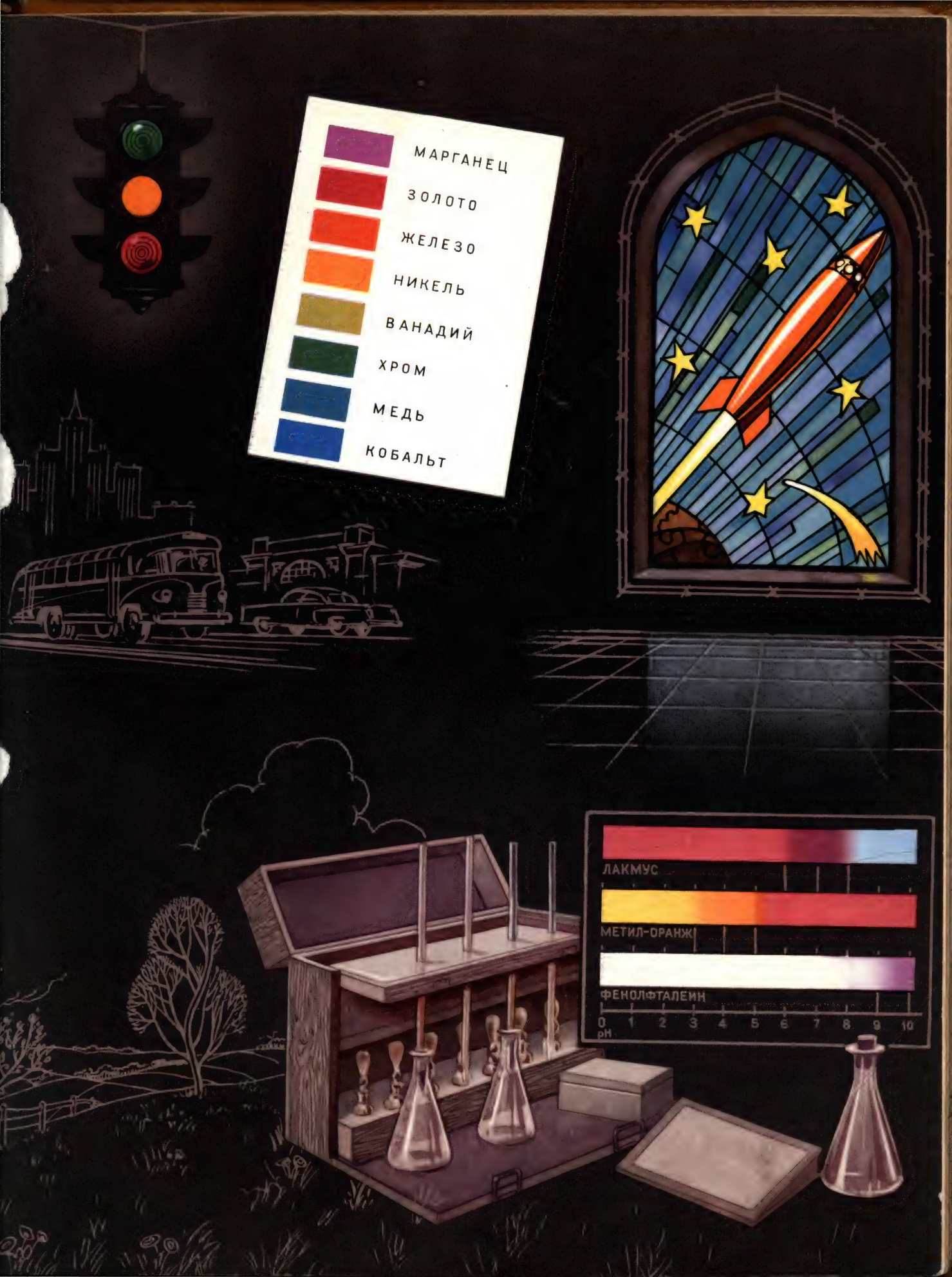
Соли кальция легко обнаруживаются разбавленной серной кислотой. При этом выпадает белый осадок сернокислого кальция, или гипса. Подобный же белый осадок образуют и соли бария, дающие сернокислый барий. Однако осадок бария отличается от осадка гипса тем, что гипс имеет очень характерную, легко запоминающуюся кристаллическую структуру, которую можно обнаружить под микроскопом или через лупу (см. цв. табл.). Характерные кристаллы соли кальция образуются также с виннокислым натрием (см. ту же цветную таблицу).

Соли магния открываются солями фосфорной кислоты в присутствии солей аммония. Для этого к раствору солей магния приливают некоторое количество раствора хлористого аммония и аммиака до слабого запаха, а затем при взбалтывании — раствор двузамещенного фосфата натрия. Выпадает белый мелкокристаллический осадок двойной соли магния и аммония — $MgNH_4PO_4$, который обладает еще тем свойством, что очень легко «ползет» вверх по стенкам пробирки.

Соли аммония, а также серную, соляную и азотную кислоты и их соли можно легко обнаружить довольно простыми реакциями.

Для открытия солей аммония к сухой соли, помещенной в пробирку (или к раствору соли),

Таблица 41. В середине верхней части рисунка изображена окраска стекол, в которых содержатся небольшие количества солей марганца, золота, железа и других металлов. Некоторые виды этих цветных стекол мы постоянно видим в светофорах (рисунок слева) и витражах (рисунок справа). В нижней части рисунка изображено изменение цвета различных индикаторов (лакмуса, метилоранжа и фенолфталеина) в зависимости от кислотности и щелочности растворов. Эти индикаторы являются неотъемлемой принадлежностью любой походной лаборатории и ящика-лаборатории.


МАРГАНЕЦ
ЗОЛОТО
ЖЕЛЕЗО
НИКЕЛЬ
ВАНАДИЙ
ХРОМ
МЕДЬ
КОБАЛЬТ
ЛАКМУС
МЕТИЛ-ОРАНЖ
ФЕНОЛФТАЛЕИН
0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10
pH

$CaCl_2$
$Ba(NO_3)_2$
$Sr(NO_3)_2$
$(CuOH)_2CO_3$
МАЛАХИТ
KCl
NaCl
Cl^-
K^+
Cl^-
Na^+

приливают раствор щелочи и нагревают. При этом ощущается запах аммиака, образующегося по реакции:

$$NH_4Cl + NaOH = NaCl + H_2O + NH_3.$$

Так распознаются, в частности, аммонийные удобрения.

Серная кислота и ее соли дают с солями бария белый осадок сернокислого бария, не растворяющийся при последующем прибавлении азотной кислоты.

Соляная кислота и ее соли, как указывалось выше, дают с азотнокислым серебром белый осадок хлористого серебра.

Азотную кислоту и ее соли открывают при помощи солей двухвалентного железа и серной кислоты. Для этого к водному раствору соли приливают в пробирку несколько капель сернокислого железа. Затем пробирку немного наклоняют и осторожно приливают по ее стенке 1—2 *см*^{3} концентрированной серной кислоты. Серная кислота, как более тяжелая жидкость, собирается на дне пробирки. При наличии солей азотной кислоты на границе между раствором серной кислоты и раствором азотнокислых солей появляется бурая окраска. В этом месте образуются окрашенные соединения железа сложного состава, в молекулы которых входят окислы азота.

МЕТАЛЛЫ

СКОЛЬКО МЕТАЛЛОВ ОБСЛУЖИВАЕТ НАС

Оглянитесь вокруг себя или взгляните на рисунок (стр. 626), и вы поразитесь, как много металлов обслуживает нашу повседневную жизнь.

Что мы видим на столе? Чайник из алюминия, стакан в подстаканнике из серебра или мельхиора — сплава меди с никелем, вскрытую консервную банку из жести — луженого железа, т. е. железа, покрытого тонким слоем олова, и, наконец, столовый набор, возможно, из нержавеющей стали и латуни. Нержавеющая сталь — сплав железа и хрома, а латунь — сплав меди с цинком.

Посмотрите на свой столовый нож: не оттиснуто ли на его блестящем, чуть голубоватом лезвии клеймо «нерж. ст.», а на чуть золотистой рукоятке — «латунь»? На таких ножах, вилках и ложках никогда не появляются пятна ржавчины.

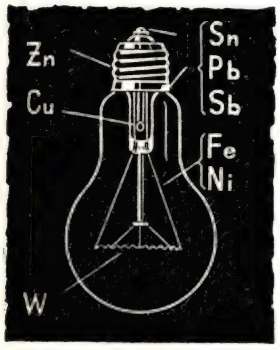
Вот уже в убранстве одного лишь стола мы насчитали восемь металлов. Посчитаем теперь, сколько металлических материалов участвует в освещении нашей комнаты. В электролампочках светятся тончайшие раскаленные электрическим током нити из чистого вольфрама, ток же к ним подводится электропроводами из чистой меди. В составе электролампочки вы найдете ту же латунь, чистый цинк (из него обычно изготовляется патрон), припой — легкоплавкий сплав олова со свинцом и сурьмой. Он настолько мягок, что его можно срезать с цоколя перегоревшей лампочки ножом. Из припоя состоит нижний контакт электролампочки и спай патрона с проволочкой, подводящей ток к нити накала, сама же эта проволочка из платинита — сплава железа с никелем.

Но список обслуживающих нас металлов далеко еще не исчерпан. Мы упустили из виду стенной термометр — стеклянную трубочку с чистой ртутью — одним из немногих металлов, со-

Таблица 42. Вверху изображены разноцветные огни салюта, образующиеся из раскаленных паров различных металлов. В лаборатории такие пары можно получить путем внесения на кончике платиновой проволоки в пламя горелки летучих солей этих металлов, например хлористого кальция ($CaCl_2$), азотнокислого бария ($Ba(NO_3)_2$) и т. п. (изображено вверху слева и в середине). Внизу слева изображен малахит ($Cu_2(OH)_2CO_3$), который, обладая зеленым цветом, окрашивает пламя горелки в голубой цвет. В центре таблицы изображены спектральные линии, которые можно наблюдать в поле спектроскопа при рассмотрении пламени через трубку спектроскопа. Внизу справа изображены решетки кристаллов поваренной соли ($NaCl$) и хлористого калия (KCl), а рядом с ними форма кристаллов, получающихся при действии на растворы поваренной соли кремнефтористоводородной кислотой, а на растворы хлористого калия — винной кислотой.

храняющихся в расплавленном состоянии при обычных температурах. Далее — настенное зеркало. Смотрясь в него, мы видим свое отражение в тончайшем слое чистого серебра, нанесенном на заднюю поверхность стеклянной пластинки. Затем гвозди из железа, хромированные или никелированные (т. е. покрытые тонким слоем чистого никеля или хрома) изделия, статуэтки из бронзы — сплава меди с оловом... Но и это далеко не все.

Если такое простое приспособление, как электролампочка, включает в себя не менее семи металлов, можно легко себе представить, как пополнился бы список металлов, обслуживающих нас, если бы в наше поле зрения попал такой сложный прибор, как телевизор. Еще большее число их входит в автомобиль или самолет.



КАК ПРИМЕНЕНИЯ МЕТАЛЛОВ СВЯЗАНЫ С ИХ СВОЙСТВАМИ

Металлы мы узнаем среди других веществ по их особому, металлическому блеску. Блестят они потому, что отражают падающие на них лучи света, а не пропускают их сквозь себя, как стекло, и почти не поглощают, как сажа. Это общее свойство металлов. Но ярче всего оно проявляется у серебра. Вот почему его применяют для изготовления зеркал, иногда, впрочем, его заменяют алюминием. Металлы хорошо отражают не только видимый свет, но и невидимые радиоволны. Поэтому металлические зеркала используются также в радиотелескопах, улавливающих радиоизлучение Солнца, Луны, Млечного Пути и «радиотуманностей», и в радиолокаторах, обнаруживающих самолеты на расстоянии сотен километров от наблюдателей.

Такое же общее свойство металлов — электропроводность. Без металлов невозможно было бы передавать по проводам электрическую энергию на десятки и сотни километров от вырабатывающей ее электростанции или разговаривать по телефону. Здесь на первом месте среди металлов оказывается опять серебро, и вплотную к нему примыкает медь. Вот почему электропровода изготавливаются из чистой меди. Впрочем, чистый алюминий проводит ток даже лучше меди, если изготовить из него провода большей толщины, чем медные, но одинакового с ними веса. Поэтому в электротехнике алюминий, будучи значительно дешевле меди, частично заменяет ее.

Нить накала электролампочки раскаливается за счет сопротивления, оказываемого ею электрическому току, поэтому для изготовления ее, наоборот, нужен металл со сравнительно малой электропроводностью. Таких металлов много, но из них выбран вольфрам, так как при достаточно малой электропроводности он превосходит все металлы тугоплавкостью. Нити из большинства других металлов при включении электролампочки либо мгновенно плавились бы, либо в короткий срок испарялись.

Вот в чем причина необычайного изобилия металлических материалов, обслуживающих нашу жизнь: для каждого металлического изделия и каждой металлической детали подбирается или создается «по заказу» такой именно металл или металлический сплав, который наилучшим образом удовлетворяет назначению изделия или детали.

Электрическое освещение обратилось бы в

электрическое отопление, если бы, наоборот, электропроводка была изготовлена из вольфрама, а нити накала — из меди. Такие электролампочки не стали бы светиться, а электропроводка излучала бы в комнату потоки тепла.

Но почему же из вольфрама не делают спирали для электроплиток? Это опять было бы грубой ошибкой. Не только потому, что вольфрам слишком дорогой металл, но и потому, что он выдерживает длительное накаливание только в вакууме или в химически инертном газе. На воздухе же он быстро окисляется.

Итак, новое назначение требует нового, специально для него приспособленного металлического материала.

СПЛАВЫ

Техника нуждается в металлических материалах с самыми разнообразными свойствами и сочетаниями свойств. Так, для изготовления типографского шрифта, которым отпечатана эта книга, потребовался металлический материал, достаточно легкоплавкий (чтобы из него легко было отлить литеры) и в то же время достаточно твердый (иначе литеры износились бы прежде, чем был отпечатан весь тираж). При этом сплав должен точно воспроизводить форму, в которой отливаются литеры. В списке чистых металлов такого металла, в котором сочетались бы все заданные свойства, нет. Свинец легкоплавок, но слишком мягок, его можно царапать даже ногтем. Сурьма легкоплавка и достаточно тверда, но слишком хрупка.

Радиолокатор.

Сплав же свинца с сурьмой и незначительным количеством олова обладает плавкостью свинца и твердостью сурьмы, но лишен ее хрупкости. В момент затвердевания этот сплав слегка расширяется и поэтому точно воспроизводит форму, в которой отлит. Вся эта сумма свойств, а не каждое в отдельности и делает наш сплав почти незаменимым типографским металлом.

Другое свойство свинца — его высокий удельный вес — используется, например, для изготовления охотничьей дроби. Но и здесь вредит делу мягкость свинца. Вследствие громадного давления пороховых газов при выстреле дробинки из свинца расплющиваются и ружейный ствол изнутри «освинцовывается» — покрывается слоем свинца. Заменить его другим металлом? Платина достаточно тверда и при этом почти вдвое тяжелее свинца. Но она слишком дорога, и у нее другие назначения. Каждый выстрел платиновой дробью или пулей стоил бы неизмеримо дороже, чем убитая дичь. Чем искать среди металлов заменители свинца, проще «исправить» его, сплавив свинец с небольшим количеством той же сурьмы.

Не подумайте, что при сплавлении металлов их свойства просто складываются или же что свойства сплавов представляют что-то среднее между свойствами сплавленных металлов. Типографский сплав плавится при более низкой температуре, чем каждый из входящих в его состав металлов. Еще более легкоплавки припои в соответствии с их назначением соединять, спаивать металлические части. А ведь припой состоит из тех же самых металлов — свинца, олова и сурьмы. Так, простейший из припоев — третник, состоящий на одну треть из свинца и на две трети из олова, — плавится при 181°, в то время как точка плавления свинца 327°, а олова 232°. Особенно легкоплавки сплавы висмута, хотя сам он плавится лишь при 271°. Из висмутового сплава с точкой плавления всего в 60° изготовляют кольца, удерживающие пробки в автоматическом оборудовании, которое представляет собой водопроводную сеть, проложенную по потолку здания и снабженную ввинченными в трубы спринклерами. При возникновении пожара кольца в спринклерах плавятся, пробки напором воды вышибаются и открывают воде путь к огню (рис. 1). Такую сеть

устраивают в театрах, на складах горючих материалов, на деревообделочных и текстильных предприятиях.

Сплавляя одни и те же металлы, но в разной пропорции, можно получать сплавы с разными свойствами и разного назначения.

Корпус ваших ручных часов, возможно, изготовлен из хромоникелевой стали, а пружина — уж обязательно из элинвара. И то и другое — сплавы железа с хромом, никелем и углеродом. Но в состав нержавеющей стали входит 18% Cr, 35% Ni, а в состав элинвара — 8% Cr, 35% Ni. Именно при таком составе элинвар проявляет свойство, делающее его незаменимым в изготовлении пружин: бесподобную упругость, почти не изменяющуюся при колебаниях температуры — от самых трескучих морозов до самой сильной летней жары. При другом соотношении тех же составных частей, например 15% Cr, 60% Ni, получается нихром — сплав с низкой электропроводностью и высокой жароупорностью, применяемый в электронагревательных устройствах (например, в электроплитках).

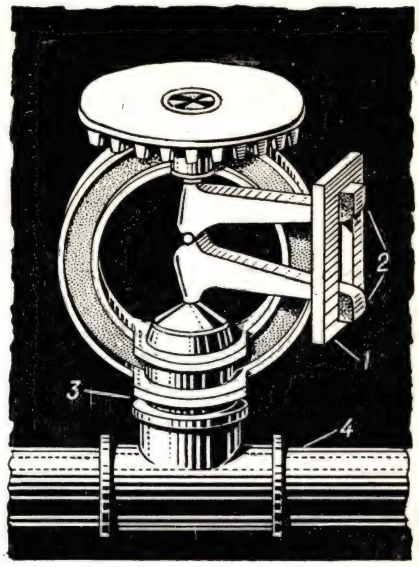


Рис. 1. Устройство спринклера: 1 — легкоплавкое кольцо; 2 — пробка; 3 — соединение с водопроводной трубой; 4 — водопроводная труба.

Сплав того же железа с 49% Ni обладает одинаковым со стеклом и платиной коэффициентом расширения при нагревании. Это платинит. Без платинитовой проволочки, впаянной в стеклянную оболочку электролампочки, нельзя было бы осуществить подводку тока к нити накала, так как другие металлические материалы (за исключением слишком дорогой платины) при изменении температуры расширяются либо больше, либо меньше, чем стекло, и сцепление металла со стеклом нарушается.

Сплавы чрезвычайно разнообразны по составу, свойствам и назначению. Но в современной технике больше всего применяются углеродистые легированные стали, основу которых составляет самый дешевый и доступный из металлов — железо.

ЧЕМ ЧУГУНЫ ОТЛИЧАЮТСЯ ОТ СТАЛЕЙ

Железа добывается из недр земли больше, чем любого другого металла. Но чистого железа вы не видели. Этот серебристый металл слишком мягок, а поэтому мало пригоден для изготовления изделий (за исключением сердечников электромагнитов). В промышленности, в строительстве, в домашнем быту употребляют не чистое железо, а разнообразнейшие железные сплавы — чугуны и стали.

Они сильно отличаются друг от друга по своим свойствам. Стальным пером вы легко выцарапаете свою фамилию на чугунной сковородке. Чугунный же осколок будет только скользить по поверхности стальных коньков и никакого вреда им не причинит. Огромное большинство сталей тверже чугуна.

Как ни старайтесь, вам не удастся согнуть чугунную сковородку: при большом усилии она не выдержит — хрустнет, сломается, но не согнется. Лезвие же стального обеденного ножа сгибается и снова выпрямляется. Чугун хрупок, а сталь упруга. Впрочем, упругость стали имеет свой предел: лезвие ножа нельзя согнуть в дугу — оно сломается.

Каждый день, заводя часы, вы скручиваете часовую пружину. Заведенная пружина раскручивается, тянет шестеренки-колесики — часы идут. Они служат вам многие годы, и изо дня в день, 365 раз в году, скручивается и раскручивается пружина, не утрачивая упругости.

Как мы уже говорили, такие пружины делаются из особо упругой стали.

Стремительно вращается сверло сверлильного станка, все глубже вонзаясь в стальную плиту. Через короткое время в плите появляется сквозное отверстие. Такие сверла, а также резцы изготовлены из особой, быстрорежущей стали.

Металлурги изготовляют сотни разнообразных сортов («марок») сталей, десятки сортов чугуна. Во всех них непременно содержится углерод. Поэтому чугуны и стали называют железоуглеродистыми сплавами.

Больше всего углерода (более 2%) содержат чугуны. В сталях углерода менее 2%; совсем мало его в мягких сталях, или ковком железе. Из ковкого железа прокатывают

листы кровельного железа, протягивают проволоку; из железной проволоки изготовляют на прессах-автоматах гвозди. Удар молотка-пуансона по выступающему из матрицы кончику проволоки — и он сплющен в шляпку будущего гвоздя. Удар откусывающих ножей — и от проволоки отделяется готовый гвоздь с заостренным концом (рис. 2).

Мягкость и податливость ковкого железа по сравнению с твердыми сталями и чугунами полезна не только при изготовлении из него проволоки или гвоздей, но иногда и при применении изготовленной из него продукции. Так, сапожные гвозди, чтобы не царапать пола, должны истираться вместе с кожей.

По химическому составу чугуны и стали отличаются друг от друга не только содержанием углерода. В состав железоуглеродистых сплавов входят в небольших количествах и другие элементы — неметаллы (кремний, фосфор, сера) и металлы. Увеличивая содержание одних элементов, уменьшая содержание других, вводя разнообразные легирующие металлы (хром, ванадий, титан и пр.), металлурги получают разнообразные специальные стали. Одни из них обладают удивительной упругостью, другие «сверхтверды», третьи не подвергаются коррозии ни на воздухе, ни в воде.

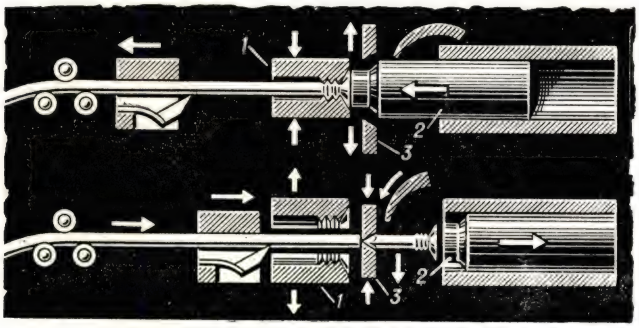


Рис. 2. Изготовление гвоздей на прессах-автоматах: сверху — процесс изготовления шляпки;, внизу — заострение конца гвоздя (1 — матрицы, 2 — пуансон, 3 — откусывающие ножи).

Огромная область нашей промышленности, которая занята получением чугунов, сталей и ковкого железа, называется черной металлургией, а сами железоуглеродистые сплавы — черными сплавами.

КАКИЕ БЫВАЮТ ЧУГУНЫ

Если железную проволоку нагревать электрическим током, то сначала она все более провисает — от нагревания железо расширяется. При 760° проволока без всяких видимых изменений вдруг перестает притягиваться магнитом. А при 906° с железом происходит новое изменение: проволока внезапно натягивается т. е. сжимается, объем железа уменьшается. При этой температуре расположение атомов в железе изменяется и обыкновенное железо, или альфа-железо (рис. 3), превращается в гамма-железо (рис. 4). Одно из отличий гамма-железа от альфа-железа заключается в способности гамма-железа науглероживаться: оно впитывает в себя углерод, как губка впитывает воду, пока не насытится им. Наконец, при 1539° железо плавится, превращаясь в подвижную, легко расплескивающуюся жидкость. Жидкое железо еще более жадно поглощает углерод, чем твердое гамма-железо.

Железо выплавляют из его руд с помощью кокса. Последний как раз и представляет собой почти чистый углерод. Поэтому ослепительно блестящая струя, вырывающаяся по сигналу доменщика из доменной печи и с шумом низвергающаяся в ковш,— это не чистое железо, а раствор углерода в жидком железе — чугун.

Что же произойдет при затвердевании жидкого чугуна? Жидкое железо начнет превращаться в кристаллы железа. Но эти кристаллы не в состоянии удержать в себе всего растворившегося углерода. Излишек углерода выделяется в виде графита, получается серый чугун.

Отливка из серого чугуна слагается из кристаллов железа, переслоенных тонкими широкими чешуйками графита. Рис. 5 показывает, как выглядит поверхность серого чугуна под микроскопом. Рассекающие рисунок во всех направлениях тонкие, словно трещинки, полоски — это и есть разрезанные поперек пластинки графита. Графитовые чешуйки легко расщепляются, как спрессованная стопка бумаги. Поэтому графит — «слабое» место серого чугуна.

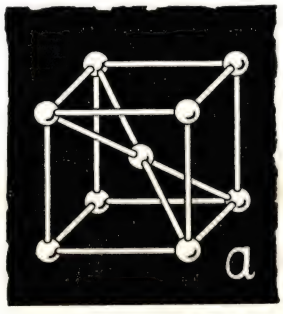


Рис. 3. Расположение атомов в альфа-железе.

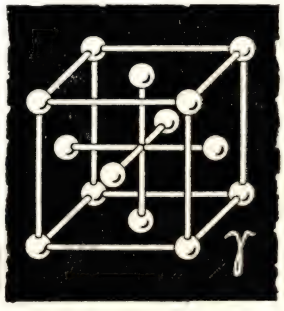


Рис. 4. Расположение атомов в гамма-железе.

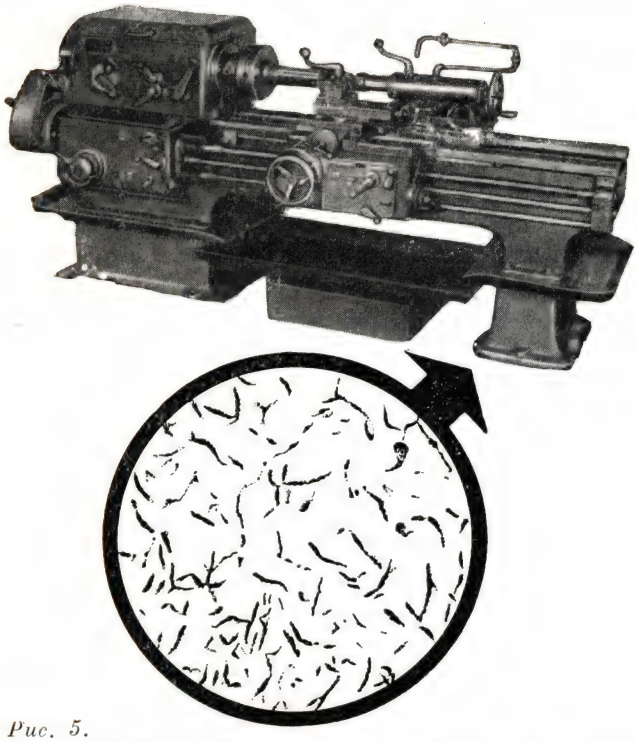


Рис. 5.

При ударе отливка из серого чугуна разбивается на куски вдоль прослоек графита, как если бы прослойки графита были в самом деле трещинками. Тусклый серый цвет графита обнаруживается в изломе чугуна. Теперь понятно, почему такой чугун хорошо отливается в формы, но хрупок и его нельзя ковать.

Из серого чугуна отливают станины машин, маховые колеса, плиты, канализационные трубы.

Теперь посмотрите на рис. 6. Так выглядит под микроскопом отшлифованная поверхность высокопрочного чугуна, впервые полученного в СССР. Он получился при затвердевании обычного чугуна. Но графит теперь не рассекает отливку тонкими пластинками, он «блокирован» в отдельных участках в виде включений шарообразной формы. Это достигнуто тем, что в расплавленный чугун перед его разливкой в формы ввели незначительное количество магния. Из высокопрочного чугуна можно поэтому отливать и такие ответственные детали, как коленчатый вал мощного судового двигателя.

На примере высокопрочного чугуна мы познакомились с одним из способов изменять по заказу свойства сплавов — с применением модификаторов. При модифицировании химический состав сплава не меняется: ведь высокопрочный чугун по составу практически ничем не отличается от обыкновенного. Изменяются лишь форма, размеры и расположение кристаллов тех веществ, из которых сплав образован.

При быстром затвердевании чугуна в особых условиях избыточный углерод выделяется не в виде графита, а в виде блестящих белых кристаллов цементита — химического соединения углерода с железом (Fe_3C). В противоположность графиту цементит очень тверд, но вместе с тем очень хрупок. Благодаря ему очень тверд и хрупок и белый чугун.

Когда белый чугун выдерживается в течение нескольких дней при высокой температуре, содержащийся в нем цементит постепенно разлагается, из него выделяется углерод в виде таких же шаровидных скоплений, как и при модифицировании чугуна. Так получается еще один вид чугуна — ковкий чугун.

На примере белого и ковкого чугуна мы познакомились еще с одним, наиболее важным способом изменения свойств сплавов — с термической обработкой.

КАК ЗАКАЛЯЕТСЯ И ОТПУСКАЕТСЯ СТАЛЬ

Большая часть выплавляемого в доменных печах чугуна переделывается в сталь. Для этого из расплавленного чугуна выжигается углерод, но не до конца, а лишь до тех пор, пока его останется не более $2^0/_0$.

Для каждого стального изделия нужно подобрать наиболее подходящий сорт стали. Так, железнодорожные колеса желательно изготовлять из мягкой, а поэтому вязкой стали, их ободья (бандажи) — из более твердой стали, так как иначе при трении о рельсы колеса быстро изотрутся, а оси, на которые насажены колеса,— из еще более твердой стали.

Твердость стали придает содержащийся в ней углерод. Но вот что получилось при забивании трех гвоздей в твердое дерево: один из них сломался при первом же ударе, второй затупился, согнулся, и шляпка его расплющилась. И только третий послушно вошел в дерево. А между тем все три гвоздя изготовлены из одной и той же марки стали, с одним и тем же содержанием углерода. В чем же здесь секрет? Дело в том, что гвозди прошли разную термическую обработку.

Двигателем в наших часах служит стальная пружина, изготовленная на заводе. Заводя часы, мы ее скручиваем. Стремясь принять

первоначальную форму, пружинка постепенно раскручивается и приводит в действие весь тонкий и сложный механизм часов. Но, если пружинку перекрутить, она сломается. Упругость и хрупкость — вот какие два свойства стали проявляются здесь. Первое свойство наряду с твердостью делает сталь почти незаменимым поделочным материалом. Со вторым же свойством поневоле приходится мириться.

Эти свойства стальное изделие получает во время закалки. Для закалки его нагревают, но не до температуры плавления, а лишь до превращения альфа-железа в гамма-железо, и дают время атомам углерода проникнуть в его кристаллы. Гамма-железо способно вбирать в себя до 2% углерода, но ведь в сталях и содержится не более 2% углерода.

Если теперь изделие медленно охладить, в нем произойдет то же, что в затвердевающем чугуне: освобождение железа от растворившегося в нем углерода.

Проделайте эту операцию со стальным пером, иголкой или кусочком стальной проволоки, и вы убедитесь, что материал неузнаваемо изменился. Он теперь совсем легко и послушно сгибается не ломаясь и уже не возвращается к первоначальной форме. Упругость и твердость а вместе с тем и хрупкость утрачены. Вновь нагрейте докрасна ваше изделие, но охладите его на этот раз быстро, бросив в холодную воду. В результате вы получите все ту же твердую, упругую, но хрупкую закаленную сталь.

Что же происходит при закалке стального изделия? Атомы углерода вследствие быстроты охлаждения не успевают выделиться из кристаллов железа. Эти «застрявшие» атомы и придают особые свойства закаленной стали.

Закалкой термическая обработка стального изделия не заканчивается. В закаленном состоянии сталь получает наивысшую твердость, но становится такой же хрупкой, как тот же чугун. Чтобы возвратить ей уничтоженные закалкой качества, изделие подвергается последней операции — отпуску. Его еще раз нагревают, но до сравнительно невысокой температуры. Стальной инструмент отпускается при температурах всего 120—150°. При этом твердость его почти не снижается, а хрупкость уменьшается. Для пружин и рессор сохранение высокой твердости несущественно, поэтому их подвергают отпуску при более высоких температурах (300—400°), при которых ценой значительной потери твердости достигается наибольшая упругость.

ЛЕГИРОВАННЫЕ СТАЛИ

Сталь остается твердой и упругой лишь до тех пор, пока она закалена, т. е. пока углерод остается растворенным в железе. Но при нагревании закалка стали исчезает, она становится мягкой. Поэтому резцы и сверла из обыкновенной стали не выдерживают значительного нагревания в процессе их применения. Здесь на помощь приходит вольфрам — тот самый металл, из которого изготовлена нить вашей электролампочки. Добавка к стали при ее выплавке около 20% вольфрама позволяет углероду удерживаться в твердом растворе вплоть до температур красного каления. Так делают быстрорежущую инструментальную сталь, сохраняющую твердость даже при красном калении. Применение резцов из такой стали позволяет сильно увеличить скорость резания металла, во много раз повысить производительность металлообрабатывающих станков.

Быстрорежущая сталь относится к сталям легированным, т. е. содержащим, помимо углерода, добавочные элементы.

Как разнообразны применения стали — от стального пера до реактивного самолета, пронзающего пространство со сверхзвуковой скоростью,— так разнообразны и предъявляемые ей в каждом случае требования. Многие из них металлург оказывается в состоянии удовлетворить, усложняя состав стали теми или иными легирующими элементами. И только тогда, когда

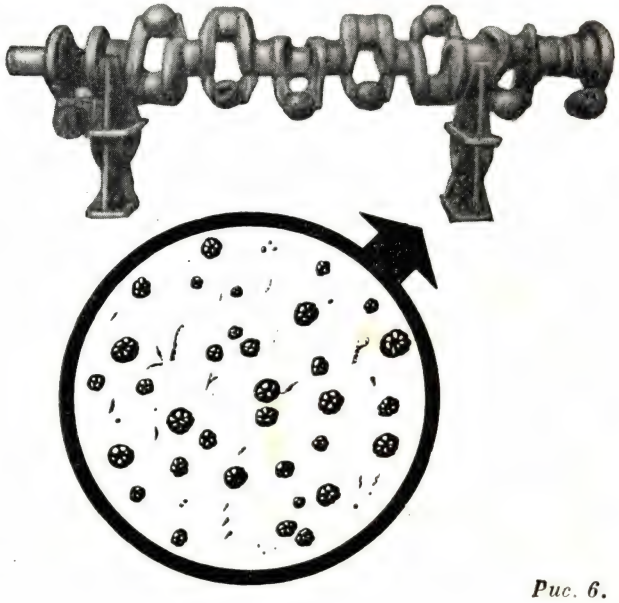


Рис. 6.

эти возможности полностью исчерпаны, он отказывается от стали и обращается к другим сплавам. Таким образом по заказу металлообрабатывающей промышленности был создан победит — безжелезный сверхтвердый сплав из карбида (т. е. соединения с углеродом) того же вольфрама с кобальтом. Применение сверхтвердых сплавов позволяет еще более увеличивать скорость резания металлов — до десятков метров в секунду.

В ТЕХНИКУ ПРИХОДЯТ НОВЫЕ МЕТАЛЛЫ

В течение веков человек не испытывал нужды в других металлах, кроме железа. В XIX в. распространение машин и развитие железнодорожного транспорта вызвало стремительный рост производства чугуна и особенно сталей. Вместе с тем появились и совершенно новые потребители металлов, такие, как электротехника, авиация. Вслед за железом началось быстрое развитие производства меди для электропромышленности. Для завоевания же воздушной стихии потребовались совершенно новые металлы — прочные, как сталь, но не в пример ей легкие. И химия с помощью электропромышленности доставила такой материал. Это был алюминий.

Первые слитки алюминия, появившиеся на промышленной выставке под рекламным названием «серебро из глины», поразили воображение посетителей. Люди привыкли к большому удельному весу металлов и не хотели верить, что здесь нет никакого фокуса, что слитки не полые внутри. Но в будущее нового металла было еще трудно поверить, так как он стоил чуть ли не столько же, сколько золото. Однако благодаря быстрому удешевлению электроэнергии цена на алюминий стремительно падала. Вскоре новый металл стал доступен для самого широкого применения, но, конечно, опять-таки не в чистом виде.

Чистый алюминий мягок и податлив еще в большей степени, чем чистое железо. Однако сплавлением алюминия с небольшими количествами других металлов (меди и марганца) были получены алюминиевые сплавы — жесткие, прочные, упругие, приближающиеся по конструктивным качествам к сталям при почти втрое меньшем удельном весе (2,8 против 7,87).

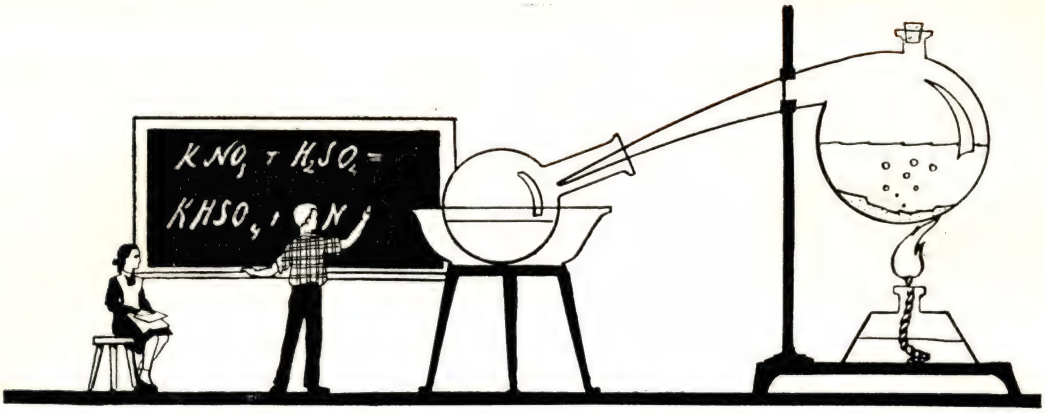
Со временем и у алюминия появился довольно серьезный соперник. Это был магний, сплавы которого при вполне удовлетворительных механических качествах обладали еще меньшим удельным весом — 1,8.

Казалось, что задача обеспечения авиации легкими и прочными конструктивными материалами решена. Но авиация вступила в новый этап. Преодолев барьер скорости звука, она неожиданно встретилась с новым, «тепловым» барьером. Трение летательной машины при сверхзвуковой скорости о воздух оказалось настолько сильным, что алюминиевые и магниевые сплавы не выдержали этого испытания: запас прочности их оказался исчерпанным. И опять встал вопрос о новом металле, достаточно легком и способном выдерживать сильный нагрев без значительного уменьшения прочности. В наши дни таким металлом оказался титан.

Титановые сплавы имеют не столь уж малый удельный вес — 4,5—5. Однако это искупается их высокой жароупорностью. К тому же титановые сплавы не подвержены разрушающему действию даже морской воды. Пластинка из титана, пробывшая несколько лет в морской воде, оказалась совершенно не тронутой коррозией. Таким образом, титан явился счастливой находкой не только для авиации, но и для судостроения.

XX век часто называют веком атомной энергии, завоевания Космоса и пластических масс. Но, хотя пластические массы и приходят на смену цветным металлам во многих областях техники, это не значит, что век металлов кончился. Современные наука и техника по-прежнему немыслимы без металлов. И производство машин, и строительное дело, и транспорт, и атомные электростанции, и космические ракеты — все они нуждаются в металлах.

Вот почему в решениях XXI съезда КПСС наряду с высокими темпами роста выпуска пластических масс предусматривается резкое увеличение производства черных и цветных металлов, и в первую очередь легированных сталей, меди и алюминия, а также титана и редких металлов.



Химическая реакция

ХИМИЧЕСКОЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ И КАТАЛИЗ

Недалеко от Москвы на железнодорожной станции в тупике стояла 25-тонная цистерна, которая ничем не отличалась от сотен ей подобных, но железнодорожники поглядывали на нее с опаской. Цистерна была с соляной кислотой, страшным врагом металла, особенно стальных рельсов. В истории железнодорожных крушений записано немало аварий, вызванных неосторожной перевозкой соляной кислоты, попавшей на рельсы и разрушившей их.

Почему же соляная кислота, так быстро разрушающая железные и стальные изделия, не разрушила стальных стенок цистерны?

Дело в том, что в соляную кислоту было добавлено небольшое количество, около 1%, вещества, которое замедляет растворение железа в кислоте. А изменяются ли при этом другие свойства кислоты? Оказывается, нет.

Действие такого рода добавок, замедляющих растворение металла в кислоте, вы можете сами наблюдать на простом опыте. Для этого вам только придется купить в аптеке таблетки уротропина. Опустите железный гвоздь в раствор соляной кислоты. Гвоздь, конечно, будет растворяться, покрываясь пузырьками выделяющегося при этом водорода. Добавьте теперь в раствор кислоты немного уротропина, и выделение водорода почти полностью прекратится. Так «постороннее» вещество, каким является уротропин, может замедлять, а в некоторых случаях практически останавливать растворение металла в кислоте.

Свойства кислоты при этом не изменяются. Если вы бросите в стакан с кислотой, к которой добавлен уротропин, кусочек мела, то кислота будет так же бурно взаимодействовать с мелом, как и без уротропина, выделяя углекислый газ.

Имеется целый ряд веществ, добавление которых замедляет взаимодействие кислоты с металлом.

А нельзя ли, пользуясь другими добавками, ускорять химическое взаимодействие веществ?

Проделаем следующий опыт. Нальем в стакан раствор йодистого калия и серной кислоты. При взаимодействии йодистого калия с кислотой образуется йодистоводородная кислота, из которой при добавлении перекиси водорода выделяется свободный йод.

Йод легко обнаружить, если прилить немного слабого раствора крахмала — раствор посинеет. При обычных условиях реакция протекает очень медленно и слабое посинение появляется лишь спустя 1—2 часа (см. цв. табл. на стр. 640).

Поставим этот опыт иначе. Стакан предварительно ополоснем слабым раствором какой-либо соли молибдена. Вылив раствор соли молибдена, вымоем стакан водой и только после этого нальем в этот стакан растворы йодистого калия и серной кислоты, а также немного крахмала. Посинение появится моментально.

Оказывается, достаточно еле уловимых следов постороннего вещества, в данном случае соли молибдена, чтобы реакция во много раз ускорилась.

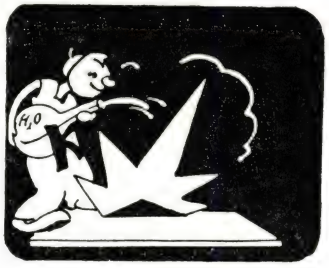
В роли ускорителя очень часто выступает и вода. Смесь порошкообразного алюминия и кристаллического йода, предварительно растертого в порошок, не обнаруживает видимых изменений. Однако достаточно на эту смесь уронить каплю воды, и произойдет вспышка — результат бурного взаимодействия йода с алюминием (см. ту же цв. табл.).

При нагревании в пробирке порошок бертолетовой соли сначала расплавится, а затем начнет разлагаться с выделением кислорода. Но реакция идет настолько медленно, что тлеющая лучинка, внесенная в пробирку, не загорится. Если же в расплавленную бертолетову соль добавить немного черного порошка двуокиси марганца, произойдет бурное разложение соли, и тлеющая лучинка, внесенная в пробирку, загорится ярким пламенем. Когда бертолетовая соль полностью разложится, в пробирке останется хлористый калий и ... все та же двуокись марганца.

В фитиль обычной спиртовой горелки вставим платиновую проволоку, закрученную сверху в виде спирали. Подожжем фитиль и, когда проволока раскалится, погасим пламя. Проволока продолжает ярко светить до тех пор, пока в горелке есть спирт (см. ту же цв. табл.).

Происходит, как говорят, беспламенное горение. Платиновая проволока ускоряет процесс окисления (горения). После этой реакции химические свойства платиновой проволоки не изменяются. Во всех этих опытах платина, вода, двуокись марганца, уротропин остаются неизменными, но под их влиянием изменяется скорость той или иной реакции. В одних случаях реакция тормозится, в других — ускоряется.

Такие вещества, которые изменяют скорость химических реакций, а сами в конце реакции остаются химически неизменными, получили название к а т а л и з а т о р о в (от греческого слова «каталюзис», что значит «разрушение»).



Вода ускоряет реакцию между алюминием и кристаллическим йодом.

ВИДЫ КАТАЛИЗА

Катализаторы, замедляющие химические реакции, называются отрицательными катализаторами или и н г и б и т о р а м и. В нашем примере уротропин является ингибитором растворения железа в соляной или серной кислоте.

Двуокись марганца ускоряет реакцию выделения кислорода из бертолетовой соли.

Катализаторы, ускоряющие химические реакции, называются положительными катализаторами.

Различают гомогенный и гетерогенный катализы. В том случае, когда реагирующие вещества образуют однородную массу с катализатором, например когда все вещества находятся в жидком или газообразном состоянии, говорят о гомогенном катализе. Гетерогенный катализ определяется различным состоянием катализатора и реагирующих веществ. Так, реакция йодистоводородной кислоты с перекисью водорода в присутствии раствора молибденовой соли является примером гомогенного катализа, а беспламенное горение в присутствии платиновой проволоки служит примером гетерогенного катализа.

Являются ли катализаторы посторонними веществами в химических реакциях?

Рассмотрим каталитическую реакцию получения диэтилового эфира. Получается это вещество из винного (этилового) спирта. К этиловому спирту добавляется немного серной кислоты, и смесь нагревается до 140°. При этом получается этилсерная кислота:

$$\underset{\text{этиловый спирт}}{C_2H_5OH} + \underset{\text{серная кислота}}{H_2SO_4} \rightarrow \underset{\text{этилсерная кислота}}{C_2H_5OSO_2OH} + H_2O. \quad (1)$$

Этилсерная кислота взаимодействует в свою очередь с новыми порциями спирта, которые все время добавляются в реакционный сосуд:

$$C_2H_5OSO_2OH + C_2H_5OH \rightarrow \underset{\text{диэтиловый эфир}}{C_2H_5OC_2H_5} + H_2SO_4. \quad (2)$$

В результате образуется диэтиловый эфир, а серная кислота освобождается, чтобы принять участие в превращении новых порций спирта в эфир.

Таким образом, с помощью небольшого количества серной кислоты можно превратить в эфир большие количества спирта. Более того, по окончании реакции кислоты останется столько же, сколько было взято.

Но разве кислота в процессе реакции была посторонним веществом? Ведь она принимала деятельное участие в реакции, входя в состав промежуточного соединения — этилсерной кислоты. Поэтому говорить, что катализатор является посторонним веществом, неправильно.

В случае разложения бертолетовой соли с помощью двуокиси марганца также сначала образуется промежуточное соединение, легко распадающееся на кислород и двуокись марганца.

НЕМНОГО ИСТОРИИ

Трудно сказать, когда впервые люди начали практически пользоваться катализаторами. Добавка дрожжей в тесто при выпечке хлеба, прибавление солода при варке пива применялись издавна.

Но научное исследование явлений катализа началось лишь в конце XVIII — начале XIX в. Серную кислоту в это время получали не так, как сейчас, а сжигая серу с селитрой. Образующуюся смесь газов, в которую входили сернистый газ и окислы азота, перекачивали в стеклянные бутыли или свинцовые камеры. На дно бутылей или камер наливалась вода, в которой смесь растворялась с образованием серной кислоты.

Если сера сжигалась без селитры, серная кислота не получалась. В этом случае получался сернистый ангидрид, который, растворяясь в воде, давал не серную, а сернистую кислоту.

В чем же дело? Какую роль здесь играет селитра? Это было установлено в 1805 г. французскими химиками Клеманом и Дезормом. Они показали, что окислы азота, образующиеся при сжигании селитры, передают один атом кислорода сернистому ангидриду, а затем вновь окисляются, присоединяя кислород из воздуха. Поэтому количество окислов азота остается практически постоянным.

Но это открытие было забыто.

Шесть лет спустя русский ученый Константин Кирхгоф, изучая осахаривание крахмала, нагревал обычный крахмал — картофельную муку — с водой, слегка подкисленной серной кислотой. Крахмал сначала превращался в клееобразное вещество, так называемый декстрин, а затем в виноградный сахар. К концу реакции

вся кислота, хотя без нее осахаривание крахмала не происходит, остается неизрасходованной.

В 1826 г. английский ученый Дэви открыл, что спирты легко окисляются воздухом до углекислого газа и воды в присутствии платины. Это и есть тот опыт беспламенного горения, о котором мы говорили выше.

После этих открытий начались интенсивные поиски новых катализаторов и изучение их действия.

ОСОБЕННОСТИ ДЕЙСТВИЯ КАТАЛИЗАТОРОВ

Катализаторы не только обладают чудесным свойством изменять скорость химических реакций, но и дают им определенное направление.

Так, например, обыкновенный (этиловый) спирт при нагревании разлагается с образованием газа этилена и воды и одновременно с образованием водорода и уксусного альдегида. Обе эти реакции протекают одновременно и при обычных условиях очень медленно. При пропускании паров этилового спирта через предварительно нагретую трубку с окисью алюминия спирт почти полностью разлагается на этилен и воду.

Если заменить в трубке катализатор, а именно заполнить ее кусочками меди, то спирт превращается в уксусный альдегид и водород:

$$\text{Этиловый спирт} \begin{cases} \xrightarrow{\text{окись алюминия}} C_2H_4 + H_2O \\ \xrightarrow[\text{медь}]{} CH_3CHO + H_2. \end{cases} \quad (3)$$

В одном случае от спирта отщепляется вода, а в другом — водород.

Следовательно, когда одно вещество, как например спирт, может одновременно реагировать по двум направлениям, то, подобрав катализатор, можно ускорить реакцию в каком-либо одном направлении. Это свойство катализатора получило название **избирательности** или **селективности**.

На использовании этого замечательного свойства катализаторов основан промышленный метод получения искусственного жидкого топлива.

Дело в том, что при реакции между окисью углерода и водородом, в зависимости от природы катализатора и условий проведения реакции, можно получить самые разнообразные продукты, начиная с горючего газа метана и кончая метиловым спиртом.

Так, если в качестве катализатора применять никель, то при атмосферном давлении из окиси углерода и водорода получается метан и вода:

$$CO + 3H_2 \rightarrow CH_4 + H_2O.$$

При замене никеля окисью хрома или двуокисью молибдена из этих же продуктов при обычном давлении получается метиловый спирт:

$$CO + 2H_2 \rightarrow CH_3OH.$$

Пропуская пары метилового спирта с воздухом через медный катализатор, получают ценный продукт — формальдегид, который служит для изготовления пластических масс.

Применяя кобальтовый катализатор, из окиси углерода и водорода получают углеводороды, содержащиеся в нефти.

АКТИВАТОРЫ КАТАЛИЗАТОРОВ

Не все катализаторы достаточно активны. Именно поэтому возникла мысль, нельзя ли и для самих катализаторов подобрать катализаторы — вещества, которые увеличивали бы их активность. Оказалось, что такие вещества существуют.

Эти вещества, не будучи сами катализаторами, повышают активность катализаторов в десятки раз. Так, при получении метана из окиси углерода и водорода применяют в качестве катализатора никель. Добавка к никелевому катализатору всего 0,5% металла церия значительно повышает активность никелевого катализатора.

Вещества, которые сами не являются катализаторами, но повышают активность катализаторов, получили название **промóторов** или **активаторов**.

Активаторы широко применяются в каталитических реакциях. Так, например, пятиокись ванадия, являющаяся катализатором в реакции окисления сернистого ангидрида в серный, активируется небольшими количествами щелочи.

При производстве аммиака из водорода и азота в качестве катализатора обычно применяют железо; активаторами здесь служат окислы калия и алюминия.

На никелевом катализаторе из CO и H_2 образуется метан. Реакцию можно ускорить добавкой промóтора — металла церия.

КАКОВА РОЛЬ КАТАЛИЗАТОРОВ В ХИМИЧЕСКОЙ РЕАКЦИИ

Катализаторы ускоряют или замедляют химические реакции. Но если вещество не реагирует с другим, то никакой катализатор не сможет вызвать химического взаимодействия этих веществ. Значит, катализаторы влияют только на скорость химических реакций и их направление, но каких-либо новых реакций не вызывают.

Чтобы понять действие катализаторов, вспомним, что молекула, для того чтобы прореагировать, обязательно должна столкнуться с другой. Однако не каждое столкновение молекул приводит к химическому взаимодействию. Для того чтобы такое столкновение было удачным, или, как говорят, эффективным, т. е. чтобы две молекулы прореагировали, они должны обладать достаточной энергией.

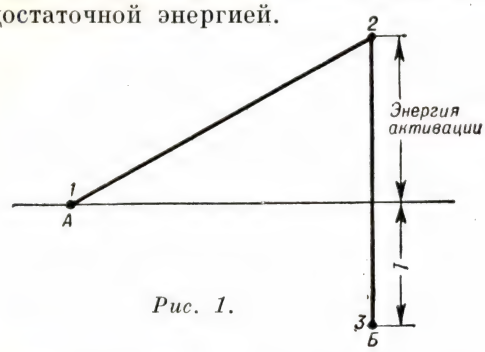


Рис. 1.

К реакции приводят только такие столкновения, когда молекулы приобрели определенный избыток энергии. Эта избыточная энергия получила название энергии активации.

Как же можно увеличить количество эффективных столкновений?

Это можно сделать двумя путями.

Первый путь — повысить энергию молекул, т. е. увеличить число молекул, обладающих избытком энергии. Этого можно достигнуть нагреванием реагирующих веществ. Однако этот путь не всегда осуществим, потому что многие вещества не выдерживают высоких температур.

Другой путь — это снижение энергии активации.

Энергию активации можно представить в виде своеобразного энергетического барьера или забора, который должна преодолеть молекула, для того чтобы вступить в реакцию. Поясним это с помощью рис. 1. На нем мы видим энергетические изменения, происходящие во время химической реакции.

Возьмем реакцию, которая протекает с выделением тепла.

Здесь исходное вещество *А* вначале обладает бо́льшим запасом энергии, чем продукт реакции *Б*. На рисунке это выражено различными уровнями. Исходное вещество *А* находится на уровне первом, а продукт реакции — на уровне третьем, более низком. Разность уровней — первого и третьего — соответствует теплоте *Т*, выделяющейся в результате реакции.

Но для того чтобы молекула могла спуститься с первого уровня на третий, ей надо преодолеть так называемый энергетический барьер, показанный на рисунке уровнем вторым.

От вершины 2 молекула вещества *А* может уже беспрепятственно спуститься на уровень 3. Разность уровней первого и второго и есть энергия активации, т. е. та избыточная энергия, которая необходима для того, чтобы молекулы вступили в реакцию.

Роль катализатора сводится к тому, что он уменьшает энергию активации и тем самым способствует взаимодействию большего количества молекул друг с другом.

На рис. 2 изображен катящийся с горы лыжник. Ему предстоит взобраться на следующую гору. Он взберется на нее в том случае, если скорость его достаточно велика. Однако ему можно серьезно помочь в преодолении этой горки, если на каком-то уровне проделать через нее тоннель.

Роль катализатора и сводится к тому, что он как бы образует тоннель в энергетическом барьере и тем способствует его преодолению.

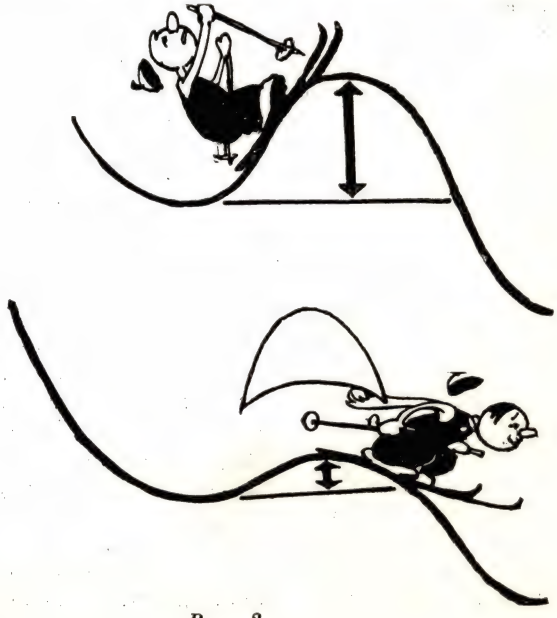


Рис. 2.

КАК ЖЕ ДЕЙСТВУЕТ КАТАЛИЗАТОР

Исследования показали, что механизм действия катализаторов может быть различным.

Разберем некоторые примеры. Допустим, что молекула A соединяется с молекулой B и образует продукт C:

$$A + B = C. \quad (4)$$

Но эта реакция протекает очень медленно вследствие большой энергии активации. Пусть имеется третье вещество K, способное соединяться с A и давать продукт AK:

$$A + K = AK. \quad (5)$$

Энергия активации этой реакции мала. Образовавшийся промежуточный продукт AK реагирует с B также при небольшой энергии активации:

$$AK + B = C + K. \quad (6)$$

Здесь вещество K — катализатор.

Механизм его действия ясен. Он участвует в реакции, направляет ее по пути с наименьшей энергией активации и в конце концов выделяется в свободном виде.

Катализатор способствовал соединению A с B, но сам остался неизменным.

В опыте с бертолетовой солью и двуокисью марганца сначала образуется соединение $Mn(MnO_4)_2$, которое легко распадается на двуокись марганца и кислород.

Не всегда удается выделить промежуточное соединение в свободном состоянии в случае гетерогенного катализа, когда катализатором является твердое вещество. Здесь некоторая часть молекул превращаемого вещества прилипает к его поверхности или, как говорят, адсорбируется поверхностью. Между частицами катализатора и молекулами превращаемого вещества возникает связь, прочность которой может изменяться в широких пределах. В ряде случаев образование такой связи требует некоторой энергии активации. Катализатор и превращаемое вещество вступают в непрочное химическое соединение, остающееся на поверхности катализатора. Это так называемая а к т и в и р о в а н н а я, или химическая, а д с о р б ц и я. Адсорбированные молекулы легко вступают в реакцию взаимодействия вследствие того, что энергия активации, необходимая для превращения адсорбированной молекулы, меньше, чем для превращения свободной.

Адсорбированная молекула изменяет свое состояние легче, чем свободная, так как связь между атомами внутри молекулы ослаблена за счет взаимодействия этих атомов с катализатором. При этом также несколько изменяется и расстояние между атомами в молекуле превращаемого вещества.

Дело в том, что на поверхности катализатора имеются особые, так называемые активные центры, или активные участки. Атомы молекул притягиваются этими активными участками. Расстояние между атомами изменяется, связь ослабляется, и молекула становится более реакционно активной.

Однако очень прочное соединение вещества с активными центрами приводит к тому, что катализатор перестает действовать.

Это называется о т р а в л е н и е м к а т а л и з а т о р а, а вещества, отравляющие катализатор, называются к а т а л и т и ч е с к и м и я д а м и.

Во многих химических производствах исходные вещества содержат каталитические яды, которые быстро отравляют поверхность катализатора. Так, например, при получении серной кислоты в воздухе и в сернистом газе содержится еле уловимое количество мышьяка и его соединений.

Мышьяк является сильнейшим каталитическим ядом. Поэтому исходные продукты тщательно очищают от его примеси.

Отсюда следует, что достаточно очень малого числа молекул, которые могут прочно закрепиться на поверхности катализатора, чтобы прекратить каталитическую реакцию.

Это и позволяет сделать вывод, что реакция идет не на всей поверхности катализатора, а только на отдельных участках — активных центрах. Установлено, что в случае железных катализаторов, которые применяются при синтезе аммиака, лишь 0,5% их поверхности приходится на активные центры.

ОДНО ИЗ ВЕЛИЧАЙШИХ ИЗОБРЕТЕНИЙ ЧЕЛОВЕЧЕСКОГО РАЗУМА

Всем известно, что если в виноградный сок, или водный раствор меда, или сахарный сироп добавить дрожжей, то эти жидкости через некоторое время начнут пениться и шипеть — «бродить».

При брожении жидкости теряют сладкий вкус, т. е. сахар исчезает.

Куда же исчезает сахар? Почему пенится жидкость?

Причина этого заключается в том, что дрожжи, представляющие собой колонии грибков, содержат катализаторы. Но это катализаторы

Если в мед добавить дрожжи, он начинает пениться и шипеть — «бродить».

уже несколько иного типа, чем те, о которых мы говорили выше. Основой дрожжевых катализаторов являются белковые вещества.

На дне сосуда, где идет брожение, выпадают осадки. Эти осадки в состоянии сбраживать новые порции сахара. Они представляют собой зерна дрожжей. Их называют закваской или ферментом, от латинского слова «ферментум» — закваска. В дальнейшем все катализаторы белкового происхождения стали называть ферментами или биокатализаторами.

В клетках растений и животных происходят многочисленные процессы, без которых невозможна жизнь. Ферменты являются ускорителями этих процессов.

Избирательное действие у ферментов еще больше, чем у неорганических катализаторов. Каждый фермент ускоряет только одну какую-нибудь реакцию: например, пепсин (фермент, содержащийся в желудочном соке) разлагает белки на пептоны; жиры расщепляются на глицерин и жирные кислоты ферментом липазой, который выделяется поджелудочной железой.

Кроме белков и жиров, в нашей пище содержатся углеводы, в частности крахмал, представляющий собой сложное образование из остатков молекул глюкозы, которые, соединяясь между собой, образуют длинные цепочки с разветвлениями.

На рисунке показаны частицы крахмала. Каждый кружок обозначает одну частицу глюкозы. Строение молекулы крахмала, как видно из рисунка, сложно. Здесь различают внутренние и внешние цепочки.

Внутренние цепочки—это небольшие группы, состоящие из 3—4 частиц, а внешние — из 6—7 частиц глюкозы.

Крахмал расщепляется в процессе пищеварения под действием фермента амилазы. Но оказывается, что существует амилаза двух видов: альфа-амилаза и бета-амилаза.

Бета-амилаза действует лишь на боковые, внешние группы молекул крахмала, отщепляя от них отдельные молекулы сахара.

Альфа-амилаза расщепляет внутренние цепи, образуя клееподобное вещество, так называемый декстрин.

Эти ферменты играют исключительно большую роль при выпечке хлеба. Если просто смешать муку с водой и испечь хлеб, то мы получим жесткие невкусные лепешки, которые можно есть только в горячем виде. Когда же они остынут, то становятся «каменными».

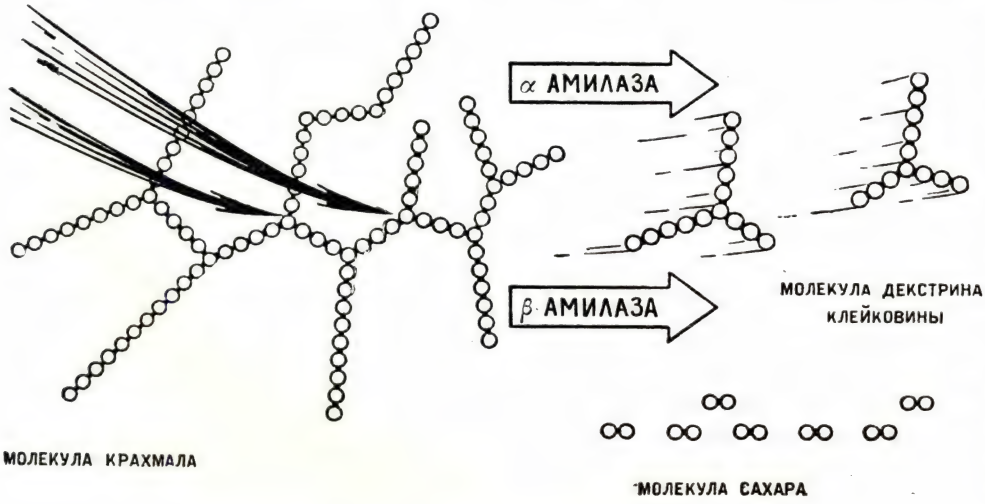
Человечество не сразу пришло к изготовлению вкусного хлеба, который мы употребляем ежедневно. Только в средние века при изготовлении хлеба стали применяться дрожжи.

Какую же роль играют здесь дрожжи?

Рассмотрим несколько подробнее химию хлебопечения.

Если в смесь муки с водой, которая образует тесто, добавить дрожжи, то тесто начинает, как говорят, «подходить». Фермент амилаза начинает действовать на сахаристые вещества муки, в результате чего они разлагаются с образованием спирта и двуокиси углерода. Этот процесс идет при температуре 35—40°. Поэтому при приготовлении теста его обычно ставят в теплое место. Пузырьки углекислого газа разрыхляют тесто.

Для того чтобы тесто, как говорят, «поднялось», стало рыхлым, сахара, который содержится в муке, недостаточно. И вот здесь-то



«И все это делается с моей помощью».

и вступает в действие амилаза. Бета-амилаза расщепляет крахмал муки до сахара, и он сбраживается дрожжами. Если в муке бета-амилазы мало, то тесто недостаточно разрыхляется, и хлеб получается малопористым и невкусным. Уже давно было замечено, что мука из зерен пшеницы, застигнутых на корню ранними морозами, обладает низким качеством и хлеб, выпекаемый из такой муки, невкусный.

В чем же дело?

Оказалось, что в таких зернах наряду с бета-амилазой содержится много альфа-амилазы, которая доводит расщепление до декстрина, клееподобного вещества.

Активность альфа-амилазы можно понизить, если тесто подкислить. Поэтому при выпечке хлеба применяют закваску, содержащую бактерии, перерабатывающие сахар в молочную кислоту. Следовательно, нельзя выпечь хороший хлеб без применения органических катализаторов, ферментов. Недаром К. А. Тимирязев сказал, что ломоть хорошо испеченного хлеба составляет одно из величайших изобретений человеческого разума.

ЖИВОЕ ИЛИ НЕЖИВОЕ

Ферменты в практике издавна применялись в виде дрожжей. Дрожжи — живые одноклеточные организмы. Поэтому возникла теория об «организованных ферментах», обладающих особой «жизненной силой».

Теория о непознаваемой «жизненной силе» ферментов была опровергнута русским ученым В. А. Манассеиным.

Было известно, что дрожжевые клетки, основой которых является белок, разрушаются при температуре свыше 60°.

Манассеин нагрел раствор, содержащий дрожжи, выше 60°. Дрожжевые клетки были убиты. Несмотря на это, раствор по-прежнему вызывал брожение сахара. Он умерщвлял дрожжевые клетки салициловой кислотой. Но действие ферментов опять-таки не прекращалось. Этими простыми опытами и было доказано, что ферменты действуют точно так же, как и неорганические катализаторы.

По сравнению с неорганическими катализаторами ферменты более активны, и их действие зависит от температуры и кислотности среды.

Ферменты обычно действуют при температуре 40—50°. При более низкой температуре активность их ослабляется. При высокой температуре ферменты, как и все белковые вещества, свертываются (денатурируются) и теряют активность.

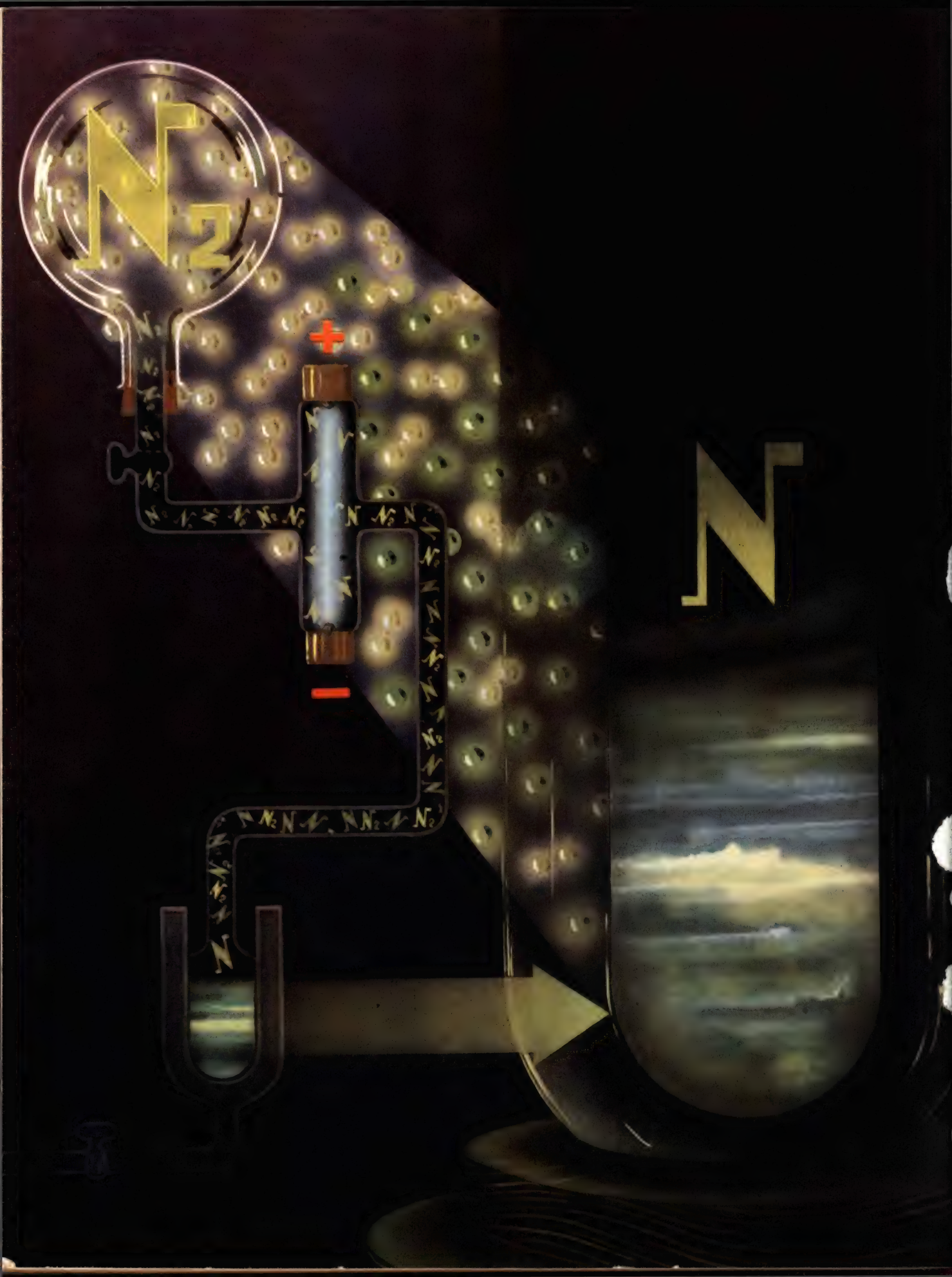
Избирательность действия ферментов сказывается и в том, что их активность проявляется при определенном значении кислотности. Так, например, пепсин, содержащийся в желудочном соке, активен только в сильно кислой среде, а трипсин — в щелочной среде.

Ферментативные процессы лежат в основе производства чая, табака, спирта. Ферменты регулируют важнейшие процессы, протекающие в тесте при выпечке хлеба. Ферменты играют роль при созревании сыра, изготовлении вин.

В основе действия ферментов лежит тот же механизм, что и при действии катализаторов. Сложные молекулы ферментов соединяются с молекулами того вещества, на которое фермент

Таблица 43. Если к порошкообразной смеси алюминия и йода прилить несколько капель воды, эта смесь будет бурно взаимодействовать с выделением йодистого алюминия, который образует темно-фиолетовое от паров йода облако (изображено в верхней части рисунка). Рядом — колонка синтеза хлористого водорода из свободных хлора и водорода, а вверху справа — опыт, показывающий роль молибдена в ускорении реакции между йодистоводородной кислотой и перекисью водорода. В средней части рисунка изображены набор швейных иголок, упакованных в ингибированную бумагу (рисунок крайний слева), лабораторные опыты (в эксикаторах) по изучению защитного действия ингибиторов против ржавления стали (рисунок в середине) и железная цистерна с соляной кислотой, к которой добавлено небольшое количество ингибитора. Внизу показаны каталитическая горелка и опыты с беспламенным горением спирта и разложением бертолетовой соли.

ХЛОРИСТЫЙ ВОДОРОД
ВОДОРОД
ХЛОР
СОЛЯНАЯ КИСЛОТА
ИНГИБИРОВАННАЯ
ЖЕЛЕЗНЫЕ ПЛАСТИНКИ ПОДВЕШЕННЫЕ НА СТЕКЛЯННЫЕ КРЮЧКИ
ИНГИБИТОР
ВОДА
Набор
КАТАЛИТИЧЕСКАЯ ГРЕЛКА
РАЗЛОЖЕНИЕ БЕРТОЛЕТОВОЙ СОЛИ
БЕСПЛАМЕННОЕ ГОРЕНИЕ СПИРТА


N2
+
−
N
N

действует, образуя промежуточные продукты. Затем происходит распад промежуточных соединений, и ферменты снова восстанавливаются.

БЕСПЛАМЕННОЕ ГОРЕНИЕ

Еще Д. И. Менделеев указывал на возможность сжигания водорода без пламени, если пропускать его через мелко раздробленную платину.

Каталитическое беспламенное горение газа выгодно тем, что при этом происходит полное сгорание (окисление) топлива и дымовые газы не содержат сажи и окиси углерода. На рисунке представлена наиболее простая печь для беспламенного горения газа. Беспламенное горение позволяет отказаться от громоздких печей-топок и дает возможность строить бестопочные котлы, в которых топливо будет сгорать на поверхности самого котла...

Катализаторы широко применяются в самых разнообразных отраслях промышленности. Так, например, с помощью катализаторов жидкие масла́ превращают в твердые, из нефти получают разнообразнейшие продукты, необходимые для дальнейшего промышленного использования. В последнее время с помощью катализаторов из природного газа, а также из продуктов переработки нефти синтезируют разнообразнейшие пластмассы. В частности, получены пластмассы, из которых делают волокна, являющиеся материалом для изготовления как бытовых, так и технических тканей. На основе применения катализаторов получается искусственный каучук. Да и вообще сейчас трудно себе представить, как можно обойтись без применения каталитических реакций и катализаторов.

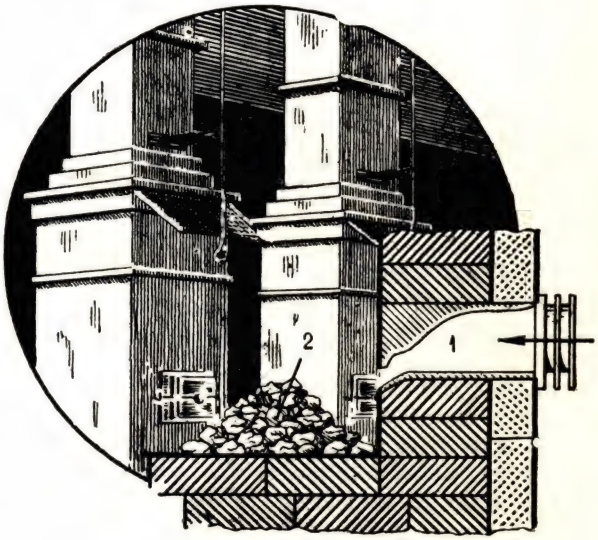
ЧТО ВЫРАЖАЮТ ХИМИЧЕСКИЕ УРАВНЕНИЯ

Горит ли водород в атмосфере хлора или хлор в атмосфере водорода, или же взрывается с оглушительным грохотом смесь этих газов при проскоке через нее электрической искры или внезапном освещении ярким светом — происходит одна и та же реакция, которую мы выражаем уравнением:

$$H_2 + Cl_2 = 2HCl. \qquad (7)$$

Когда мы смотрим на это уравнение, нашему мысленному взору представляется, как молекула хлора и молекула водорода, столкнувшись обмениваются атомами с образованием двух молекул хлористого водорода.

Но вот каковы факты. Если бы мы обладали в десять миллионов раз более острым зрением, смесь водорода с хлором представилась бы нам скопищем молекул, беспорядочно движущихся во всех направлениях. Молекулы непрерывно сталкиваются и отскакивают друг от друга, как два встретившихся в воздухе футбольных мяча. За какую-то долю секунды каждая водородная молекула смеси успеет (и не один раз!) столк-



Печь для беспламенного каталитического горения. 1 — горелка, через которую поступает газ; 2 — огнеупорный материал, являющийся катализатором.

Таблица 44. Схема превращения молекулярного азота в атомарный под влиянием электрического разряда. Справа показан «замороженный радикал» — жидкий атомарный азот.

нуться то с той, то с другой молекулой хлора. Но наша смесь газов на холоде и в темноте может сохраняться месяцы и годы, и никаких видимых признаков химической реакции мы не заметим.

Точно так же, если по неосторожности оставить открытым кран газовой плиты, молекулы горючего газа метана CH_4 проникнут в воздух, встретятся с молекулами кислорода, но смесь не загорится. Если в комнате, наполненной смесью метана с воздухом, зажечь спичку, произойдет страшный взрыв. Взрыв смеси метана с воздухом, как и горение метана, выражается уравнением:

$$CH_4 + 2O_2 = CO_2 + 2H_2O. \qquad (8)$$

После того как мы познакомились с каталитическими реакциями, уже никого не удивит, что химические уравнения, за редким исключением, не выражают действительного механизма химических реакций. В уравнениях указывают лишь начальные и конечные продукты химической реакции, но умалчивают о том, через какие промежуточные соединения начальные продукты превращаются в конечные.

Так, при окислении метана CH_4 его молекула не сразу превращается в молекулу углекислого газа CO_2. Предварительно она преобразуется в молекулы формальдегида COH_2, гидроперекиси метила H_3COOH, метилового спирта CH_3OH и т. д. Эти промежуточные вещества обычно оказываются менее устойчивыми, чем исходные вещества, и быстро превращаются в конечный продукт. Спрашивается, почему же реакция выбирает такой сложный путь, если на первый взгляд она могла бы протекать гораздо проще? Зачем исходным веществам образовывать сначала какие-то промежуточные продукты, а не сразу конечные?

По той же причине, по которой река никогда не течет прямолинейно.

В своем течении река встречает разные препятствия и как бы ищет путь, по которому ей легче всего течь. Если на ее пути встретится гора, река ее огибает. Что же это за «гора», которую химическая реакция не может одолеть, из-за которой она вынуждена искать обходные пути?

Таким препятствием для каждой реакции является все та же энергия активации.

Молекулы веществ состоят из атомов, которые связаны между собой химическими связями. Химическая реакция в том и состоит, что ряд связей в исходных молекулах разрывается; атомы перераспределяются, образуя новые связи. А для того, чтобы разорвать химическую связь в молекуле, необходимо затратить некоторую энергию, подобно тому как, например, необходимо затратить некоторую энергию на то, чтобы ракета преодолела силу земного притяжения и, оторвавшись от Земли, улетела в мировое пространство. Ракета получает эту энергию за счет работы своих двигателей. А откуда получают необходимую энергию молекулы реагирующих веществ?

В разных реакциях по-разному. В термических реакциях источником этой энергии является тепло, сообщаемое реагирующим веществам. При нагревании молекулы вещества начинают двигаться все быстрее и быстрее. Следовательно, возрастает их кинетическая энергия. Когда эта энергия превысит энергию активации, начнется химическая реакция.

Энергия, необходимая для реакции, может доставляться в виде световой энергии. Наиболее эффективны в этом отношении ультрафиолетовые лучи. Энергия ультрафиолетовых лучей достаточна, чтобы разорвать химические связи в молекулах самых различных веществ. Химические реакции, протекающие под действием света, называются ф о т о х и м и ч е с к и м и.

В последнее время интенсивно развивается сравнительно молодая наука — радиационная химия, изучающая химические процессы, идущие при облучении веществ быстрыми электронами, нейтронами и γ-лучами, являющимися продуктами распада радиоактивных веществ. При

Теплота, подобно невидимому мечу, может разрушать молекулы.

работе атомных реакторов большое количество энергии выделяется в виде таких частиц. Проблема использования этой энергии для химических реакций является очень интересной.

Рассмотрим фотохимическую реакцию между водородом и хлором:

$$H_2 + Cl_2 + \text{квант света} \rightarrow 2HCl. \qquad (9)$$

Квант света (о том, что такое квант света, см. в статье «Свет и его применение» этого же тома ДЭ), захватываясь молекулой, разрушает ее. Один квант света может разрушить только одну молекулу. Облучая смесь водорода с хлором ультрафиолетовыми лучами, ученые могли ожидать, что число образовавшихся молекул HCl будет соответствовать числу поглощенных квантов. Оказалось же, что число получившихся молекул HCl в сотни тысяч раз больше числа поглощенных квантов, т. е. в результате разрушения светом молекулы Cl_2 образуются не две (как следовало бы ожидать по уравнению реакции), а сотни тысяч молекул HCl.

Что означает выражение, что под действием света молекула Cl_2 разрушилась? Молекула хлора состоит из двух атомов, связанных химической связью, которая в структурных химических формулах обозначается черточкой:

$$\underset{\substack{\uparrow \\ \text{квант света}}}{Cl - Cl} \rightarrow Cl^{\cdot}\ Cl^{\cdot}. \qquad (10)$$

Поглощаясь молекулой Cl_2, квант света разрывает связь между атомами, атомы хлора освобождаются и разлетаются в разные стороны. В отличие от атомов, связанных в молекулах, такие атомы называются свободными.

Каждая химическая связь между атомами в молекуле создается двумя электронами, по одному электрону от каждого атома. Не все электроны в атоме участвуют в образовании химической связи, а только некоторое, вполне определенное для каждого атома количество. В атоме хлора обычно так проявляет себя всего один электрон, в атоме кислорода — всегда два, в атоме углерода — четыре, и т. д. Электроны в атоме, способные образовывать химические связи, называются **валентными электронами**, а количество их в атоме определяет **валентность** атома.

Под валентностью атома понимается то количество химических связей, которое он образует с другими атомами. Хлор, следовательно, обычно одновалентен, кислород — двухвалентен, а валентность атома углерода равна четырем.

Вспомним еще о водороде. В атоме водорода всего лишь один электрон. Этот электрон позволяет атому водорода образовывать лишь одну связь с атомом какого-нибудь другого элемента. Водород, следовательно, одновалентен.

Если валентные электроны условиться обозначать точками рядом с химическим символом элемента, то атомы водорода, хлора, кислорода и углерода можно изобразить следующим образом: $H^{\cdot}$, $Cl^{\cdot}$, $\cdot O \cdot$, $\cdot \dot{\underset{\cdot}{C}} \cdot$.

Попробуем теперь построить из этих атомов различные молекулы:

$$H^{\cdot} \text{ и } H^{\cdot} \rightarrow H - H \text{ (водород)}$$
$$Cl^{\cdot} \text{ и } Cl^{\cdot} \rightarrow Cl - Cl \text{ (хлор)}$$
$$Cl^{\cdot} \text{ и } H^{\cdot} \rightarrow H - Cl \text{ (хлористый водород)}$$
$$2H^{\cdot} + \cdot O \cdot \rightarrow \begin{matrix} H \\ H \end{matrix}\!\!>\!O \text{ (вода)}$$
$$4H^{\cdot} + \cdot \dot{\underset{\cdot}{C}} \cdot \rightarrow \begin{matrix} & H & \\ & | & \\ H - & C & - H \\ & | & \\ & H & \end{matrix} \text{ (метан).} \qquad (11)$$

Представленные этими формулами вещества существуют и хорошо известны. Чем же свободные атомы отличаются от молекул?

Очевидно, тем, что в свободных атомах есть валентные электроны, не занятые в химических связях и готовые в любой момент такие связи образовать. Совершенно очевидно, что свободные атомы должны легче вступать в химические реакции, чем молекулы. Ведь в молекулах необходимо еще расслаблять или даже разрывать связи между атомами, а в реакциях между атомами в этом нет необходимости. Можно ожидать поэтому, что энергии активации реакций атомов будут меньше, чем энергии активации реакций молекул.

Все то, что мы узнали о свободных атомах, позволяет понять, как протекает фотохимическая реакция водорода с хлором. Под действием кванта света молекула Cl_2 распадется на атомы:

$$Cl_2 + \text{квант света} \rightarrow 2Cl^{\cdot}. \qquad (12)$$

Так как в реакционном сосуде, кроме молекул Cl_2, имеются еще молекулы H_2, атомы Cl будут реагировать с ними с образованием молекулы HCl и атома $H^{\cdot}$:

$$Cl^{\cdot} + H_2 \rightarrow HCl + H^{\cdot}. \qquad (13)$$

Свободный атом $H^{\cdot}$ в свою очередь атакует молекулу Cl_2:

$$H^{\cdot} + Cl_2 \rightarrow HCl + Cl^{\cdot}. \qquad (14)$$

В результате образуется новая молекула хлористого водорода и атом $Cl^{\cdot}$, который снова может реагировать с молекулой H_2, и т. д. Чере-

дование реакций (13) и (14) образует все новые и новые молекулы хлористого водорода. Атомы хлора и водорода при этом не исчезают из реагирующей смеси, так как они все время возобновляются. Реакции (13) и (14) чередуются, как звенья в цепи, поэтому реакции такого типа были названы ц е п н ы м и. Таким образом, становится понятным, почему в результате распада на атомы одной молекулы Cl_2 может образовываться множество молекул HCl.

На первый взгляд может показаться, что в цепных реакциях достаточно появиться одному атому, чтобы реакция дошла до конца, т. е. до тех пор, пока не израсходуется хотя бы одно из реагирующих веществ. На самом деле это не так. Наряду с реакциями (13) и (14) могут иметь место и реакции между атомами $Cl^{\cdot}$ и $Cl^{\cdot}$, $Cl^{\cdot}$ и H или $H^{\cdot}$ и $H^{\cdot}$:

$$H^{\cdot} + H^{\cdot} = H - H$$
$$Cl^{\cdot} = Cl^{\cdot} = Cl - Cl$$
$$H^{\cdot} + Cl^{\cdot} = H - Cl. \qquad (15)$$

Видно, что в этих реакциях атомы «гибнут», т. е. исчезают, а других атомов взамен не появляется. Но ведь с «гибелью» одного атома обрывается целая цепочка химических превращений. Поэтому такие реакции были названы реакциями обрыва цепи.

Итак, ученые объяснили поведение реакции H_2+Cl_2, предположив, что «ведущую» роль в этой реакции играют свободные атомы хлора и водорода. Осталось доказать, что такие атомы действительно существуют. Целый ряд специально поставленных опытов показал, что в фотохимической реакции водорода с хлором действительно присутствуют свободные атомы водорода и атомы хлора. Опыты показали также, что, в отличие от молекул, атомы не могут долго существовать в свободном состоянии вследствие своей способности легко вступать в различные реакции. «Время жизни» атома, т. е. время, которое он находится в свободном состоянии, исчисляется сотыми и тысячными долями секунды.

Представление о «цепях» оказалось очень плодотворным в применении и к другим фотохимическим реакциям. Так, например, эти представления вполне приложимы к фотохимическому хлорированию углеводородов. Рассмотрим его на примере метана. Будем облучать смесь хлора с метаном. Известно, что на метан свет не действует, а молекулы хлора под действием света распадаются на атомы.

По аналогии с реакцией синтеза хлористого водорода предположим, что атомы $Cl^{\cdot}$, реагируя с молекулой метана, отрывают от нее атомы $H^{\cdot}$, образуя молекулу HCl и осколок молекулы метана $CH^{\cdot}_3$:

$$Cl^{\cdot} + CH_4 \longrightarrow HCl + CH^{\cdot}_3. \qquad (16)$$

Такие осколки молекул получили название с в о б о д н ы х р а д и к а л о в. Нетрудно заметить, что у радикала CH_3 есть очень существенное сходство со свободным атомом, а именно: он обладает несвязанным электроном. Поэтому радикал $CH_3^{\cdot}$, подобно атому $H^{\cdot}$, будет легко реагировать с молекулой Cl_2, образуя хлористый метил CH_3Cl и возрождая атом $Cl^{\cdot}$:

$$Cl^{\cdot} + CH_4 \longrightarrow HCl + CH_3^{\cdot}$$
$$CH^{\cdot}_3 + Cl_2 \longrightarrow CH_3Cl + Cl^{\cdot} \qquad (17)$$

При столкновении атомов и радикалов цепи обрываются.

На примере реакций окисления ученые столкнулись с новыми явлениями. Было установлено, что реакция окисления водорода при низких температурах и давлениях практически не идет, но стоит только немного повысить давление, и смесь водорода с кислородом реагирует со взрывом. Если и далее довольно сильно повышать давление, смесь водорода с кислородом все равно будет взрываться, пока, наконец, опять небольшое изменение давления не приведет к тому, что реакция прекратится.

Эти факты привели к созданию т е о р и и р а з в е т в л е н н ы х ц е п н ы х р е а к ц и й. Сущность ее состоит в том, что в результате реакции радикала или атома с молекулой может образоваться не один, а большее число радикалов. Происходит как бы размножение радикалов в процессе реакции. Вследствие этого возрастает концентрация радикалов, а следовательно, и скорость реакции.

По аналогии с реакцией синтеза хлористого водорода реакция соединения водорода с кислородом должна начинаться с зарождения радикалов, например с реакции:

$$H_2 + O_2 \longrightarrow H^{\cdot} + HO^{\cdot}_2. \qquad (18)$$

Затем атомы $H^{\cdot}$, реагируя с кислородом, образуют $OH^{\cdot}$ и $\cdot O \cdot$.

$$H^{\cdot} + O_2 \longrightarrow H\dot{O} + \cdot O \cdot. \qquad (19)$$

На первый взгляд эта реакция очень похожа на реакцию (14):

$$H^{\cdot} + Cl_2 \longrightarrow HCl + Cl^{\cdot}.$$

Но между ними, однако, есть принципиальная разница.

В результате реакции (14) образуется всего один несвязанный электрон. Сколько их об-

разуется в реакции (19)? Подсчитаем. Мы знаем, что атом $\cdot O\cdot$ имеет два несвязанных электрона, а радикал $HO\cdot$ — один. Следовательно, в реакции (19) образуется целых три несвязанных электрона! Атом $\cdot O\cdot$ и радикал $OH^{\cdot}$ быстро вступают в реакцию с молекулами водорода и вновь образуют радикал $OH^{\cdot}$ и два атома $H^{\cdot}$:

$$\begin{aligned} OH^{\cdot} + H_2 &\rightarrow H_2O + H^{\cdot} \\ \cdot O\cdot + H_2 &\rightarrow OH^{\cdot} + H^{\cdot}. \end{aligned} \qquad (20)$$

Так происходит размножение радикалов в разветвленных цепных реакциях. Достаточно реакции начаться (например, при проскоке через смесь электрической искры), как произойдет лавинообразное нарастание количества радикалов и атомов, а следовательно, и скорости реакции. Однако атомы и радикалы не только нарождаются, но и гибнут. Они гибнут на стенках сосуда, гибнут при встрече друг с другом. Если за единицу времени возникает атомов и радикалов больше, чем погибает, происходит взрыв: если, наоборот, реакция затухает, взрыва не происходит.

При низком давлении радикалы настолько интенсивно гибнут на стенках сосуда, что цепная лавина не может развиться. С увеличением давления гибель радикалов на стенках относительно уменьшается, и, наконец, при давлении чуть выше критического наступает такой момент, когда реакции, вызывающие гибель радикалов, уже не смогут справляться с радикалами, образующимися в реакциях разветвления цепей. Концентрация радикалов начинает быстро нарастать. Происходит взрыв.

Продолжая увеличивать давление, мы снова можем выйти из области воспламенения в область медленной реакции. Что же в этой области мешает развиваться цепной лавине? Оказывается, опять реакции гибели радикалов. Но только теперь радикалы гибнут уже во всем объеме, а не только на стенках сосуда.

Представление о возможности гибели и зарождения радикалов на стенках сосуда объяснило чрезвычайную чувствительность всех подобных реакций к состоянию стенок сосуда. Действительно, с каждым гибнущим радикалом погибает целая цепь химических превращений. Если погибнет только один радикал, в реакции не образуются сотни и тысячи молекул продуктов. Поэтому небольшое увеличение гибели радикалов за счет состояния стенок сосуда может резко изменить скорость реакции. И, наоборот, обработка стенок сосуда веществами, способными облегчать зарождение радикалов, увеличивает скорость реакции.

Радикалы могут гибнуть не только при столкновениях между собой или со стенкой сосуда, они могут погибать и в результате реакции с некоторыми посторонними веществами. Это и есть ингибиторы, о которых говорилось на стр. 634. Сильнейшим ингибитором для реакции соединения водорода с хлором является кислород. Ничтожно малые добавки кислорода значительно уменьшают скорость этой реакции. С другой стороны, цепную реакцию можно ускорить добавками веществ, которые легче, чем само реагирующее вещество, способны распадаться на радикалы. Такие вещества получили название инициаторов, а использование этих веществ для ускорения реакций называется инициированием.

Цепные разветвленные реакции были открыты и их основные закономерности сформулированы в работах советских ученых. За многолетние плодотворные исследования в области цепных химических реакций акад. Н. Н. Семенов был удостоен в 1956 г. Нобелевской премии.

Открытие большого числа химических реакций, протекающих с участием атомов и радикалов, повлекло за собой изучение строения и свойств этих чрезвычайно активных в химическом отношении соединений.

Очень важным, например, было доказательство существования метильного радикала $CH^{\cdot}_3$. Этот радикал очень активен. Он может существовать в свободном состоянии лишь тысячные доли секунды. Вслед за метильным радикалом было доказано существование и других углеводородных радикалов: этильного $C_2H^{\cdot}_5$ и метиленового $\cdot CH^{\cdot}_2$.

Применение физических методов, таких, как спектроскопический и масс-спектрометрический, ознаменовалось новыми успехами в этой области. Спектроскопически были обнаружены радикалы OH, SO, PO, CN, CH, NH, HCO и ряд других двух- и трехатомных радикалов. Применение масс-спектрометрической техники позволило обнаружить различные сложные радикалы в реакциях термического распада и других реакциях.

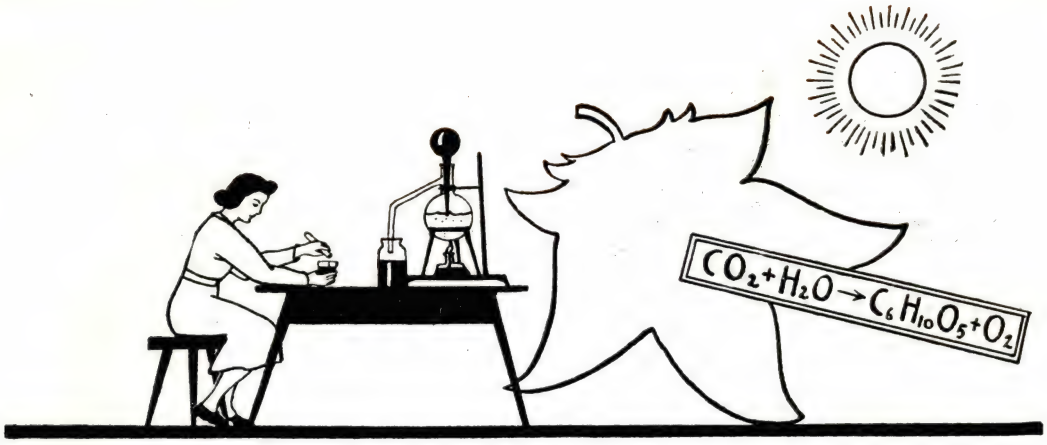
В пробирках, погруженных в жидкий азот или гелий, как в холодильниках, можно хранить свободные атомы и радикалы.

Последнее время широко стал применяться метод «замораживания» радикалов, состоящий в том, что радикалы и атомы из места, где они образуются, быстро вытягиваются в ловушки, охлаждаемые жидким азотом или жидким гелием. Температура жидкого азота очень низкая: —196°С. Температура жидкого гелия еще ниже: —268,9°С; она только на 4° выше абсолютного нуля. При этих температурах подавляющее большинство химических процессов протекать не может. Разумеется, радикалы вытягиваются из реакции не одни, а вместе с молекулами, не успевшими распасться на атомы, а замораживаются они также вместе с этими молекулами. В таком состоянии многие радикалы удается сохранять долгое время и изучать разными способами. Таким образом, радикалы, фигурирующие в цепных схемах, являются реально существующими частицами.

Зависимость протекания цепных реакций от многих факторов дает в руки ученых возможность сознательного управления химическими процессами. Трудно управлять реакцией, на которую ничто не влияет. Легче управлять реакцией, на которую влияют многие факторы. Важно только выяснить детальный механизм этого влияния, устранить вредные и усилить полезные влияния, и таким образом заставить реакцию протекать так, как это нам нужно.

В современный период построения коммунистического общества планирование науки стало такой же государственной задачей, как и планирование народного хозяйства. Решения внеочередного XXI съезда КПСС предусматривают концентрацию научных сил и средств на важнейших направлениях исследования, представляющих особый теоретический и народнохозяйственный интерес. Для химии это — проблема управления химико-технологическими процессами (катализ, цепные реакции) и проблема создания синтетических материалов с заданными свойствами, удовлетворяющими запросам современной техники.

Задача сознательного управления химическим процессом является основной задачей, которая стоит перед теми, кто изучает механизм химических реакций. Задача эта грандиозная. Многое уже сделано на пути ее решения, но несравненно больше еще предстоит сделать. Бурное развитие химии полимеров и других отраслей химической промышленности стимулирует новые исследования в области механизмов химических превращений. Наряду с теоретически интересными все большее число практически важных реакций становится предметом тщательного изучения. И не может быть сомнения в том, что на этом пути будут достигнуты новые замечательные успехи.



Химия соревнуется с природой

ОРГАНИЧЕСКИЕ ВЕЩЕСТВА ВОКРУГ НАС

Почему виноград и сахарная свекла сладкие, а лимон и щавель кислые? При выпаривании сока сахарной свеклы получают маленькие пластинчатые кристаллы — сахар. Он-то и придает зрелой свекле сладкий вкус. При выпаривании сока очищенного лимона или щавеля получают бесцветные кристаллы лимонной или щавелевой кислоты. Эти вещества и придают кислый вкус лимону и щавелю. Они, как и сахар, образовались в растениях.

В организмах животных и насекомых тоже образуется и накапливается много разных веществ. Так, например, в организме муравья содержится муравьиная кислота. Обороняясь от вторжения врагов в их жилище — муравьиную кучу,— муравьи выбрызгивают эту едкую жидкость из брюшка. Пчела строит соты из воска, в который превращаются в ее организме сладкие соки растений (рис. 1). В организмах животных и человека вырабатываются жиры, белки и множество других веществ.

Ни одного из перечисленных нами веществ мы не найдем в неживой природе. Поэтому и назвали их в свое время органическими веществами; а ту часть химии, которая занимается изучением состава и свойств, изыскивает способы получения и переработки таких веществ,— органической химией.

Кусок сахара, мяса или хлеба, как и вся наша пища, слагается из органических веществ. Из них также состоит наша одежда и топливо.

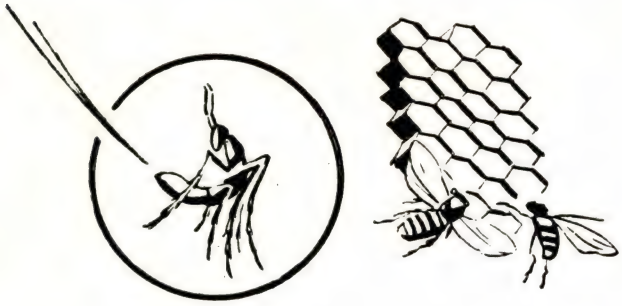


Рис. 1.

КАК РАСПОЗНАЮТ ОРГАНИЧЕСКИЕ ВЕЩЕСТВА

Рассеянным людям случается накладывать в чай соль, а сахаром «солить» суп. Ведь сахар часто похож по внешнему виду на соль. Но никто не спутает их по вкусу. Легко отличить сахар от соли и не прикасаясь к ним языком.

Если на раскаленную плиту просыпать соль с ней ничего не случится; если же просыпать сахар, он сначала растопится, потом начнет чернеть и, наконец, превратится в уголь, а комната наполнится чадом. То же происходит со многими другими органическими веществами. Если вы, поставив жариться картофель или мясо, зазеваетесь, то вместо них найдете на сковородке куски угля. Впрочем, далеко не все органические вещества при нагревании обугливаются.

Другая, гораздо более распространенная особенность органических веществ — горючесть. Всякий умеет зажечь дерево. Но попробуйте зажечь кусочек сахара. Он будет плавиться, пузыриться, шипеть, чернеть, но не загорится. Здесь нужно знать «секрет»! Посыпьте на сахар чуть-чуть пепла из печки или из пепельницы и поднесите к нему зажженную спичку — он загорится синим шумящим пламенем и сгорит весь (рис. 2). Пепел сам не горит, но здесь он служит «пособником», или, как говорят химики, катализатором, для реакции горения сахара.

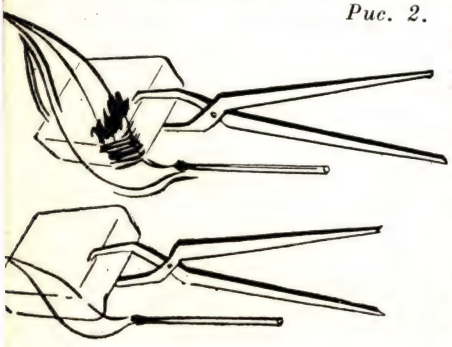


Рис. 2.

Значит, сахар может служить топливом? Случалось, что им и в самом деле топили печи. Урожайный для сахарной свеклы год становится для американских фермеров настоящим бедствием. Рынок заваливают сахаром, цены на него катастрофически падают, фермерам грозит разорение. И, чтобы поддержать цены, излишки сахара отправляются в топки печей.

Горючи почти все органические вещества. Многие из них служат нам топливом — источником тепла и света. В домах и на заводах мы используем в качестве топлива лишь наиболее дешевые из горючих органических веществ: древесину, керосин, каменный уголь.

ИЗ ЧЕГО СОСТОЯТ ОРГАНИЧЕСКИЕ ВЕЩЕСТВА

Как и все прочие, органические вещества состоят, конечно, из атомов. Но из каких именно?

В состав всякого органического вещества обязательно входит углерод. Вот почему многие из них при нагревании подгорают, обугливаются. Это атомы углерода, которые раньше были соединены с атомами других элементов, освободились и сцепились друг с другом — получились кусочки угля. Когда же органическое вещество не пригорает, а сгорает, от него не остается даже угля. Ведь атомы углерода связываются с атомами кислорода и улетучиваются в воздух в составе невидимых молекул углекислого газа.

В этом очень просто убедиться. Подержите над пламенем спички, стеариновой свечки или керосинки перевернутый стакан, стенки которого были заранее смочены раствором гашеной извести. Капли ее замутятся от растворившегося в ней углекислого газа. Нетрудно убедиться также, что в состав органических веществ входят атомы водорода. Чтобы «поймать» их, нужно опять-таки перевернуть стакан, но на этот раз сухой, и поднести под него зажженную спичку, а когда она сгорит, — другую, потом третью, четвертую, пятую (рис. 3). Уже от первой спички сухой стакан внутри слегка запотеет, как холодное стекло, если на него подышать. Затем капельки на его стенках будут все более укрупняться, и, наконец, из стакана закапает обыкновенная вода.

Рис. 3.

Кислород на ее образование идет из атмосферы, а водороду неоткуда было взяться, кроме как из сгорающего дерева. Вот мы и доказали, что в состав древесины входит, кроме углерода, и водород.

То же самое получается, если под стаканом сжигать вместо дерева сахар, крупу и другие органические вещества. Если вообразить себе путешественников, затерявшихся в безводной пустыне, но снабженных в изобилии топливом, то теоретически говоря, им не грозит гибель от жажды.

Углерод и водород входят в состав всякого органического вещества. Бензин, керосин, каучук состоят только из атомов углерода и водорода. В состав древесины, крахмала, сахара, растительных и животных жиров входят также атомы кислорода, в состав белков — атомы азота и серы.

Вот почему при гниении куриного яйца выделяется зловонный сероводород.

ПРИРОДНЫЕ «ФАБРИКИ» ОРГАНИЧЕСКИХ ВЕЩЕСТВ

Возвратимся теперь к «фабрикам», в которых производятся органические вещества в природе, — к растениям и животным. Растения извлекают углерод из невидимых молекул углекислого газа, которые всегда носятся в воздухе, а кислород и водород — из воды, впитываемой их корнями из почвы. Затем с помощью солнечного света они образуют из воды и углекислого газа молекулы сахара, крахмала, растительных масел, кислот и других веществ.

Животные, питаясь растительной пищей, «переделывают» ее в молекулы новых органических веществ.

Даже каменный уголь и нефть, которые мы добываем из недр земли,— не что иное, как остатки растений и животных, населявших Землю миллионы лет назад. Без растений и животных, без доставляемых ими органических веществ мы погибли бы от голода и холода.

ВЕЛИКОЕ СОРЕВНОВАНИЕ УЧЕНЫХ С ПРИРОДОЙ

Мы убедились в том, как легко уничтожить, разрушить органическое вещество, обратив его в уголь и углекислый газ и воду. А можно ли вновь получить разрушенное органическое вещество искусственно, из того же самого угля и той же самой воды? Тогда не нужно было бы выращивать на полях хлопок, рожь, кукурузу, сахарную свеклу, растения, в которых вырабатывается каучук. Продукты питания, материал для одежды, каучук для галош и автомобильных шин — все это можно было бы производить на заводах.

Долгое время химикам никак не удавалось получить какое-либо органическое вещество без участия растений и животных. Казалось, это вообще невозможно, и в образовании органических веществ принимает участие сверхъестественная «жизненная сила», обитающая в растениях и животных. На латинском языке слово «вита» означает «жизнь», поэтому ученых, которые верили в «жизненную силу», стали называть виталистами.

Но в один прекрасный день — это случилось около 150 лет назад — немецкий химик Вёлер извлек из своей химической реторты кристаллическое вещество, которое до сих пор получали только из мочи животных. Оно так и называется мочевиной.

А теперь?.. Теперь получены уже десятки тысяч искусственных органических веществ. Многие из них представляют собой те же самые вещества, которые мы встречаем в организмах животных и растений. Но большинство из них никогда не встречается ни в каких растительных и животных организмах и обладает совершенно новыми, невиданными в царстве животных и растений свойствами. Между органической химией и природой возникло как бы соревнование — кто из них создаст более полезные, более необходимые для жизни человека вещества. И победила в этом соревновании химическая наука!

О том, какими средствами была достигнута эта победа, и рассказывается в следующих главах этого раздела.

СОВРЕМЕННЫЙ ХИМИК И ЕГО ЛАБОРАТОРИЯ

Физики настолько усовершенствовали технику своих опытов, что научились исследовать процессы, в которых участвуют отдельные атомы или даже только осколки их. Они построили своего рода «мышеловки» с автоматической сигнализацией подобных частиц. Влетает частица в такую «мышеловку», и экспериментатор слышит щелчок: «Я здесь» или «Нас двое»!

Как далек от чего-либо подобного химик! Он никогда не видел описываемой им молекулы, он даже не слышал ее «голоса» «по телефону». Между тем химик описывает свои молекулы

с такими подробностями, как если бы он рассматривал их в микроскоп с миллионным увеличением. Искусство установления строения молекул представляется нам одним из самых удивительных подвигов человеческого разума в его великой борьбе за познание природы. Это подлинная наука и вместе с тем — одно из самых плодотворных искусств!

Оно открылось впервые в работах великого русского химика А. М. Бутлерова в середине прошлого века, а потом трудами нескольких поколений ученых приведено в состояние полного совершенства. Двадцатый век уже не смог почти ничего к нему прибавить. Правда, в результате работ физиков появилась возможность совершенно другими путями проверять, подтверждать и уточнять заключения химиков о строении молекул.

Но к чему тратить на все это время и труд? Разве наша пища станет питательнее оттого, что мы узнаем строение ее молекул? Разве от этого лекарства станут более целительными? Разве самолеты будут летать быстрее, когда мы узнаем строение молекул горючего, поступающего в цилиндры их двигателей? Разве... Но перейдем от вопросов к ответам.

Да, именно установление строения молекул позволило сделать пищу более питательной, лекарства — более целительными, увеличить скорость и грузоподъемность самолетов и добиться других, не менее значительных успехов в великом соревновании ученых с природой!

Случается, что главная часть работы химика кончилась, когда постороннему наблюдателю кажется, что он только-только приступает к работе. Химик перестает рыться в научных журналах, размышлять, чертить на бумаге причудливые узоры структурных формул и решать уравнения. Он вооружается дымчатыми очками, составляет из колб, реторт, трубок и холодильников сложное и красивое сооружение, отвешивает и заключает в сосуды нужные исходные вещества, расставляет горелки, иногда яркие лампы, открывает водяные краны и начинает ждать. Время от времени он смотрит: не слишком ли бурно идет реакция в главном сосуде, не слишком ли стремительно несутся через трубку холодильников пары и не закупоривают ли ее кристаллы. Это уже чисто созерцательная работа. Результат бурного столкновения веществ в тесной колбе уже известен и оценен заранее, если расчеты и соображения, предшествующие опыту, проведены последовательно, до конца. Химик знает, получится ли у него новая, еще невиданная краска или же новое пахучее вещество.

Современный химик — такой же изобретатель, как архитектор и машиностроитель. Разница лишь в масштабах «изобретений»: архитектор видит сооружение, которое он возводит, химик же не видит молекул, которые создает и размножает в колбе в миллиардах тождественных экземпляров. Он лишь мысленно следит за цепью их превращений и усовершенствований. Но «чертежи», с которыми химик приступает к работе и в которых наводит всевозможные справки, соответствуют архитектурным планам и конструктивным чертежам машин. В них — в структурных формулах — сосредоточена основная идея в наиболее ярком выражении, которое сумел придать ей химик. Случается, что в создании новых молекул ученый использует те же самые конструктивные идеи, которые лежат в основе чисто механических приспособлений и изобретений (в последующем мы часто будем обращаться к подобным неожиданным аналогиям).

Современная химия глубоко врастает в жизнь людей, связана с ней тысячами нитей.

Рис. 4.

Поэтому каждый должен знать, как работает химик, как он составляет свои структурные формулы, что заключает из них и каким образом подчас из грязи, из отбросов, при помощи этих формул вызывает к жизни многие сотни тысяч веществ, причем эти вещества зачастую столь полезны и нужны, что мы уже не можем себе представить, каким образом без них обходились раньше.

Может быть, читателю никогда и не придется самому устанавливать структурные формулы. Но так как далее мы все время будем опираться на строение молекул, то было бы ошибкой не рассказать об этом искусстве ровно столько, чтобы в дальнейшем рассчитывать на понимание.

КАК УСТАНАВЛИВАЮТ СОСТАВ МОЛЕКУЛ

Возвратимся к тому, что мы встречаем вокруг себя.

Первое органическое вещество, которое попадает нам в руки, когда мы садимся за утренний завтрак, — это сахар. Пока его кусок, брошенный в стакан чая, растворяется, докажем, что сахар — действительно органическое вещество. Сжигать его мы уже научились. Опрокинув над горящим куском сахара сухой стакан, мы увидим, как увлажнились его стенки, присутствие водорода в сахаре доказано. Если же стакан был смочен раствором гашеной извести, его стенки станут мутными — доказано присутствие в сахаре углерода.

Теперь взвесим кусочек сахара, а затем сожжем его в присутствии веществ, из которых одно поглощает водяные пары, а другое — углекислый газ. Оказывается, оба вещества прибавят в весе. По этой прибыли можно узнать, что при сгорании килограмма сахара получается 470 *Г* воды и 1 *кГ* 220 *Г* углекислого газа. Отсюда легко подсчитать, сколько углерода и сколько водорода содержалось в сгоревшем куске сахара. В куске рафинада, весящем 10 *Г*, содержится 4,2 *Г* углерода и 0,65 *Г* водорода. Остальной вес куска — 5,15 *Г* — приходится на третий химический элемент — кислород. Итак, состав сахара таков:

углерод — 42,0%,
водород — 6,5%,
кислород — 51,5%.

В распоряжении химиков есть миниатюрные весы особой конструкции, на которых можно точно взвесить едва видимую глазом пылинку. К сожалению, еще не существует весов для непосредственного взвешивания отдельных молекул. Поэтому вместо взвешивания молекулы сахара мы займемся измерением температуры замерзания сахарных сиропов.

Предположим, на дворе мороз и в нашем распоряжении термометр с несколькими делениями ниже нуля. Такие термометры продаются в аптеках. Водные растворы всегда замерзают при температуре более низкой, чем чистая вода, т. е. ниже 0°. Давайте растворим в литре воды 34,5 *Г* сахара и выставим раствор на мороз. Оказывается, он начинает замерзать при —0,19°. Рассчитаем, сколько нужно было бы растворить сахара, чтобы раствор замерзал не при —0,19°, а при —1,90°; оказывается, что в 10 раз больше, т. е. 342 *Г*.

Можете себя поздравить: вы нашли молекулярный вес сахара. Он равен 342! Почему? Потому, что существует закон: при растворении в литре воды одной грамм-молекулы любого вещества — не электролита — точка замерзания раствора понижается на одно и то же число градусов, а именно на 1,9°.

Что же теперь мы знаем о молекуле сахара? Что она весит 342 кислородные единицы, что в ее состав входит сколько-то атомов углерода, сколько-то атомов кислорода и сколько-то атомов водорода. Сколько именно, нам поможет решить процентный состав сахара: 42% C, 51,5% O и 6,5% H. Ведь сколько процентов каждого элемента содержится по весу в тонне сахара, столько же — не больше и не меньше — содержится и в каждой сахарной песчинке и наконец, в каждой отдельной его молекуле. Следовательно, из общего веса молекулы сахара — 342 кислородные единицы (к. е.)—приходится

на долю углерода — $342 \times 0{,}42 = 144$ к. е.,
на долю кислорода — $342 \times 0{,}515 = 176$ к. е.,
на долю водорода — $342 \times 0{,}065 = 22$ к. е.

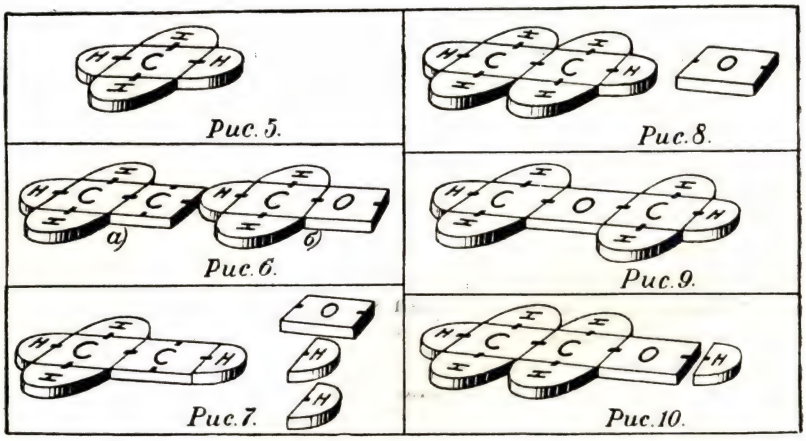
Раскроем периодическую таблицу Д. И. Менделеева и найдем в ней атомные веса углерода (12), кислорода (16) и водорода (1). Теперь легко узнать, что в молекулу сахара входит $144 : 12 = 12$ атомов углерода, 11 атомов кислорода и 22 атома водорода, т. е. молекулярная формула сахара — $C_{12}H_{22}O_{11}$.

Конечно, этого еще недостаточно, чтобы представить себе строение молекулы сахара, как недостаточно знать, какие материалы и в каком количестве израсходованы на постройку здания, о котором мы хотим составить представление. Но строение молекулы сахара слишком сложно, чтобы стоило дальше им заниматься.

Как химик переходит от молекулярной формулы вещества к его структурной формуле, покажем на более простом примере — на винном спирте. Молекулярная формула его гораздо проще, чем формула сахара C_2H_6O.

ХИМИЧЕСКОЕ ДОМИНО

Многие заполняют свой досуг нехитрой игрой в домино. Вот перед вами девять дощечек «химического домино». Условия игры те же, что и в обыкновенном домино: нужно освободиться от дощечек, приставляя их друг к другу так, чтобы все черточки на них слились друг с другом и неиспользованных дощечек не осталось. Но перед вами нет противника, который старается «ходом» своей дощечки помешать вам, сорвать ваш план. Вы играете один.



Предположим, вы взяли одну из дощечек, помеченных буквой «С», с четырьмя черточками и приставили к ней четыре полукруглые дощечки, помеченные буквой «Н» и снабженные лишь одной черточкой. Получилась фигура, изображенная на рис. 5. Игра проиграна, так как в этой фигуре не осталось свободных черточек, к которым можно было бы приставлять следующие дощечки, а их у вас в руках еще четыре штуки.

Но положение можно исправить, убрав одну из полукруглых дощечек и приставив на ее место либо вторую дощечку С, либо дощечку, обозначенную буквой «О». В первом случае получится такая фигура, как на рис. 6*а*, а во втором — как на рис. 6*б*.

Если в этих новых фигурах мы опять займем все свободные черточки полукруглыми дощечками, игра будет опять проиграна. Ведь сначала у нас на руках останется три дощечки (рис. 7), потом — одна: ее некуда будет приставить (рис. 8).

Нужно снова исправлять положение. Убираем из той и другой фигуры по одной дощечке Н и приставляем вместо нее в первом случае оставшуюся дощечку О, а во втором — дощечку С. И в том и в другом случае «партия» теперь выигрывается сразу. Во втором случае у приставленной дощечки С оказываются три свободные черточки. Остается к ним присоединить три остающиеся полукруглые дощечки. Точно так же у приставленной дощечки О в первом случае есть свободная черточка, к которой присоединяется последняя полукруглая дощечка, и на руках опять-таки ничего не остается (рис. 9 и 10).

Таким образом, задача нашего «химического домино» имеет не одно, а два решения.

Конечно, вы догадались — не случайно на дощечках написаны значки углерода, кислорода и водорода, не случайно, что этих дощечек ровно столько же, сколько атомов в молекуле, и что черточки на них обозначают валентность каждого атома. Значит, мы пришли к двум возможным схемам строения для молекул спирта. Но какая же из них соответствует действительности?

Здесь мы вспоминаем о существовании любопытного металла, получение которого сопря-

жено с большими трудностями. Это натрий. Он мягок, как воск, и очень бурно взаимодействует с водой.

Брошенный в воду, он моментально сплавляется в блестящий шарик, бегает с шипением и взрывами взад и вперед, непрерывно уменьшаясь в размерах, пока не растворится целиком. Поэтому куски натрия сохраняются в закупоренных склянках под слоем керосина. Керосин — смесь химических соединений, состоящих из водородных и углеродных атомов. Очевидно, что химические связи между этими атомами натрий бессилен разорвать. А как будет вести себя натрий в спирте? Не поможет ли он нам разрешить задачу о строении молекулы спирта?

В первой, рассмотренной нами схеме молекулы (рис. 9) все шесть атомов водорода совершенно равноценны, все они связаны, как и в молекулах, образующих керосин, непосредственно с углеродными атомами. Если бы молекула спирта была построена по этой схеме, мы имели бы основание ожидать, что натрий в спирте будет сохраняться так же хорошо, как и в керосине. Совсем иную картину представляет вторая схема (рис. 10). Из шести водородных атомов в ней только пять примыкают к атомам углерода, а шестой связан через кислород, как в воде. Следовательно, вещество с подобным строением молекулы должно относиться к натрию так же, как вода, и одна шестая часть содержащегося в нем водорода при взаимодействии с натрием должна вытесняться.

Остается бросить кусочек натрия в спирт и посмотреть, что будет дальше. Натрий растворяется, хотя и не так бурно, как в воде. Продукт реакции — белая масса — ничем не напоминает спирт, но молекула его по-прежнему содержит девять атомов. В их числе мы найдем один атом исчезнувшего натрия вместо одного водородного атома, выделившегося в воздух. Теперь у нас не может быть сомнения, что молекула спирта построена по второй схеме.

Но существует и второе вещество с таким же, как спирт, составом молекулы — метиловый эфир. Оно гораздо более летуче и обладает как раз теми свойствами, которых следует ожидать у вещества, молекула которого построена по первой схеме. Таким образом, небольшая перестановка атомов в молекуле имеет очень большие последствия. Если не метиловый эфир, то его ближайший родственник — этиловый эфир — со слегка удлиненной, но построенной совершенно по такому же принципу молекулой был известен людям почти так же давно, как спирт. Тогда уже знали, что куры, наклевавшись смоченного этим эфиром зерна, становятся нечувствительными к болевым ощущениям. Но лишь столетия спустя сначала зубные врачи, а потом хирурги применили этиловый эфир для того, чтобы приводить своих пациентов в бессознательное, нечувствительное к боли состояние во время операций.

Одинаковый состав молекул при различном их строении и свойствах настолько распространенное явление, что для него понадобилось новое слово — «изомерия». Вместо того чтобы говорить: у этих двух веществ одинаковый состав молекул, мы говорим: эти вещества — изомеры.

Итак, мы обнаружили два вещества с составом C_2H_6O. Оба они действительно соответствуют по своим свойствам двум единственно возможным схемам строения молекулы, которые предвидит теория. Мы не в состоянии мысленно создать образ третьего вещества с тем же составом молекулы, иначе говоря, третьего изомера, и в природе его также нет. Заметим, что чем сложнее молекула по составу, тем большее число изомеров возможно для нее.

Для соединений этого типа характерно цепочкообразное сочленение углеродных атомов. Цепочки эти могут ветвиться, причем весьма разнообразно. Они очень прочны и представляют собой в органической молекуле то же, что скелет у животных. Подобные же простые или ветвящиеся углеродные цепочки содержатся в бесчисленном множестве органических веществ — в нефтях, жирах и т. д.

Но есть органические вещества, к которым совершенно нельзя применить «цепные» представления. Простейшее из них — бензол. Это летучее вещество, напоминающее по свойствам керосин или бензин; но оно мало подходит для заправки керосиновых ламп, так как при сгорании дает много коноти. В молекуле бензола содержится лишь два элемента: углерод и водород, и того и другого — по шести атомов. Никакими химическими реакциями не удалось установить, что атомы углерода и атомы водорода занимают в молекуле бензола неравноценные положения. Уже по одному этому молекула его не может иметь формы цепочки. Ведь в каждой достаточно длинной цепи есть крайние и средние — неравноценные звенья. Самое простое предположение, которое можно сделать относительно строения молекулы бензола,—это представить ее в виде кольца. Кольцо — это простейшая геометрическая фигура, все точки которой геометрически равноценны. Правда, этому условию удовлетво-

ряют и некоторые другие фигуры, например трехгранная призма. Вот как был сделан правильный выбор.

Если заместить в молекуле бензола (рис. 11) один из атомов водорода атомом хлора, то в силу равноценности всех шести атомов водорода в ней всегда получится один и тот же продукт, какой бы атом водорода ни подвергся замещению. А если теперь повторить замещение водорода хлором, получатся уже три различных изомера,

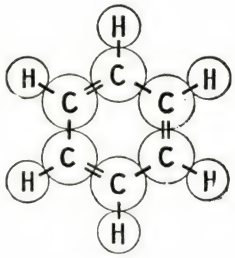


Рис. 11.

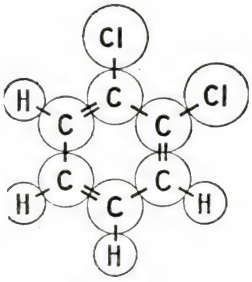


Рис. 12.

смотря по тому, в каких условиях произошла реакция. Кольцеобразная схема молекулы бензола это объясняет: два атома хлора могут примкнуть либо к соседним углеродным атомам (рис. 12), либо через один (рис. 13), либо к противоположным (рис. 14). Призматическая же фигура даст большее, чем нужно, число изомеров.

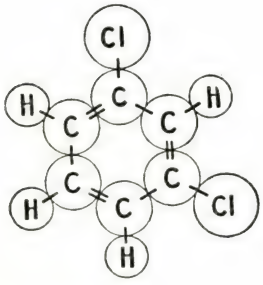


Рис. 13.

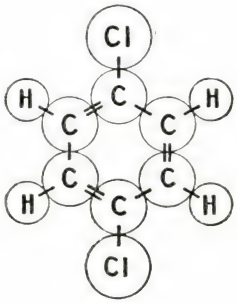


Рис. 14.

Так была доказана кольцевая схема молекулы бензола. На этой схеме базируются широко развитые отрасли практической химии. Например, в производстве красящих веществ исследования и синтезы новых красителей предпринимаются, исходя из кольцеобразной структурной формулы бензола.

Цепь и шестизвенное кольцо — вот два способа сочленения углеродных атомов, особенно часто практикуемые природой и перенятые у нее химиками-органиками. Пожалуй, большинство природных органических веществ построено по принципу цепей. Большинство же искусственных органических соединений (красящих и взрывчатых веществ, лекарств) заключает в себе углеродные кольца. Но чаще всего в молекуле комбинируются ветвящиеся цепи и кольца, так что структурная формула приобретает подчас очень причудливый вид.

Здесь небезынтересно вспомнить об одном изобретении химиков. Чтобы управлять своими колониями, империалистам необходимо держать там большое количество чиновников, солдат и миссионеров. Между тем в некоторых колониях непривычный для европейцев климат: попадая в тропики, они становятся жертвами тропических болезней.

Самой страшной для европейцев оказалась болезнь, распространившаяся около полувека тому назад на берегах Конго и по другим европейским владениям в Африке. Она была названа сонной болезнью, так как к концу ее, когда возбудитель добирается до мозга, человек после вспышек неестественного возбуждения погружается в тяжелый, свинцовый сон. Он может спать в любое время, в любом положении, вплоть до того момента, когда его настигает почти неизбежная смерть.

И вот, когда поверженной в первой мировой войне Германии диктовались условия мирного договора, союзникам стало известно, что там изобретено вещество, строение молекулы которого сохраняется как государственная тайна. Не случайно это вещество было названо германином.

Не нашлось основания запретить Германии производство германина, так как это не было ни новое взрывчатое, ни отравляющее вещество. Совсем наоборот: это было исключительной силы средство против сонной болезни.

Лучшие силы знаменитого Пастеровского института в Париже были направлены на разгадку тайны германина. Дело казалось простым и привычным: сначала качественный анализ лекарства, затем количественный; определение молекулярного веса, затем молекулярной и, наконец, структурной формулы. А раз известна структурная формула вещества, уже нетрудно разработать технологию его получения путем синтеза.

Конечно, в составе германина обнаружили углерод и водород, затем и кислород. Однако этим список элементов не исчерпался. Когда французские химики добрались, наконец, до

молекулярной формулы германина, оказалось, что она выглядит так:

$$C_{51}H_{40}O_{17}S_4N_6.$$

Молекула оказалась самой сложной из молекул веществ, применявшихся до тех пор в медицине. Но если мы вспомним, что даже такой простой молекулярной формуле, как C_2H_6O, уже отвечают два изомера, то нетрудно себе представить, какое множество изомеров отвечает формуле германина. И хотя кое-что о получении германина было известно из опубликованных ранее работ немецких ученых, французским химикам пришлось построить, может быть, добрую сотню веществ, пока в сто первом расположение атомов оказалось именно таким, как в молекуле германина.

МИР, ОТРАЖЕННЫЙ В ЗЕРКАЛЕ

Посмотрите на этот рисунок. Какие (их, по крайней мере, шесть) несообразности вам удастся в нем обнаружить? Прежде всего бросается в глаза, что человек пишет письмо не правой, а левой рукой. Впрочем, может быть, он левша? Но зачем ему пришла в голову фантазия надеть часы не на левую, а на правую руку? Что это за знакомая и вместе с тем странно незнакомая картина висит на стене? Далее, разве существует такая марка телевизора? Но взгляните на циферблат часов — и фокус разгадан. Все очень просто. Человек — не левша, часы надеты у него нормально, на левую руку, телевизор общеизвестной марки — «Темп». Виноват художник: он запечатлел изображение комнаты, каким оно выглядит в зеркале.

А теперь взгляните на рис. 15. На нем представлены схемы двух очень простых по составу молекул в их пространственном виде. Они настолько похожи друг на друга, что различия между ними не чувствуется. Между тем они нарисованы именно с таким расчетом, чтобы различие возможно резче бросалось в глаза. Эти молекулы отличаются друг от друга так, как левая рука отличается от правой или как отличается предмет от своего изображения в зеркале. В обыкновенной жизни подобное различие мы не замечаем и говорим о полном сходстве предметов.

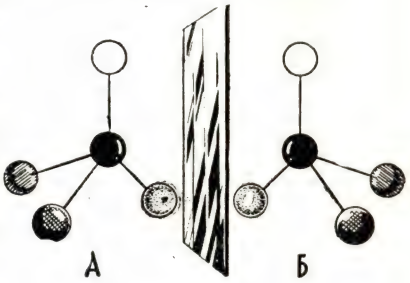


Рис. 15.

Но попробуйте, нарисовав на бумаге любую фигуру (хотя бы такую, как на рис. 15), обвести ее вторично карандашом, не следя непосредственно за его движением, а глядя в зеркало. Вам придется отказаться от этой трудной задачи и признать, что предмет и его отражение в зеркале — далеко не одно и то же с точки зрения геометрии. Суть различия заключается в том, что никаким поворотом модель молекулы *А* нельзя поставить так, чтобы глаз получил от нее точь-в-точь такое же зрительное впечатление, как и от молекулы *Б*.

Любопытно, что стоит немного упростить модель молекулы, например закрасить один из боковых шариков в тот же цвет, в какой окрашен один из трех остальных, и возможность иметь молекулу, так сказать, в двух зеркально противоположных видах исчезнет. Простым поворотом одной из моделей можно добиться полного зрительного совмещения ее с собствен-

ным зеркальным отражением. Во всем этом вы можете убедиться, если сами слепите из разноцветного пластилина подобные модели молекул.

Теперь вообразим, что мир, который мы видим в зеркале, подлинно существует и мы проникли в него, подобно героям какой-то сказки. Нас встретила бы там масса неожиданностей. Многие яды этого мира оказались бы для нас безвредными, а многие лекарства потеряли бы свою силу. Сладкие вещества имели бы другую степень сладости, и другими оказались бы ароматы цветов. В этом мире мы были бы застрахованы от многих болезней, но если бы наше пребывание в нем затянулось, то мы погибли бы от голода среди изобильной пищи, так как белки мира, отраженного в зеркале, не могли бы усваиваться нашим организмом. Фантазия ли это? И да и нет! Это искусственный прием для изложения подлинных фактов.

Многие из органических веществ имеют достаточно сложную молекулу, чтобы она отличалась от своего отражения в зеркале. При этом по загадочным для нас причинам эти молекулы встречаются большей частью в виде одной из двух возможных разновидностей: в случае одних веществ в виде «левой», а в случае других — «правой». Когда мы пытаемся искусственно создать эти же вещества в лаборатории, то тех и других молекул у нас всегда получается поровну.

Теперь мы можем разделить, рассортировать эти молекулы и получить, таким образом, вместо одного два вещества: одно только из одних «правых», а другое только из одних «левых» молекул. Никакие самые чувствительные инструменты не уловят разницы в их физических свойствах: в цвете, удельном весе, в температурах плавления и кипения. Это понятно, так как, измеряя, например, температуру плавления первого вещества, мы как бы смотрим в зеркало на тот же самый опыт, проделываемый со вторым веществом. В обоих случаях плавление произойдет в тот самый момент, когда столбик ртути в термометре и на его зеркальном отражении достигнет одной и той же высоты.

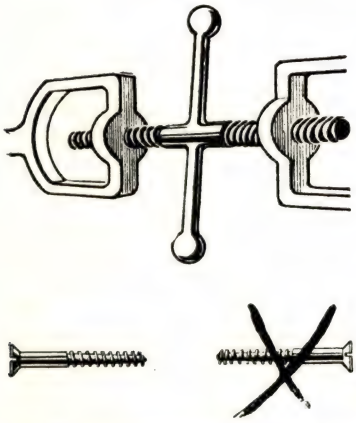


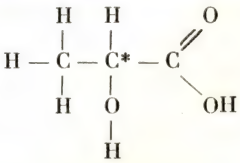
Рис. 16. Как оптические изомеры в природе, винты обычно бывают лишь одного вида — правовращающие (внизу); левовращающие применяются лишь в специальных приспособлениях (например, таких, как обойма для стягивания троса вверху).

Но существуют такие два свойства — оптическое и кристаллографическое,—которые нуждаются при их описании в примечании «вправо» или «влево». И вот здесь-то и скажется различие между нашими двумя веществами. Одно из них вращает плоскость поляризации света на определенное число градусов, минут и секунд влево, а другое — на то же число градусов, минут и секунд вправо. Что значит «вращает плоскость поляризации», вы можете подробно прочитать в статье «Свет и его применение», сейчас для нас это несущественно. Это свойство имеет большое применение в лабораторной технике, а соответствующее электрическое свойство веществ, состоящих из одних «правых», или одних «левых» молекул, или кристаллов — в радиотехнике, радиолокации и пр.

Все прочие вещества с более симметричными молекулами ни тем, ни другим свойством не обладают. Нам важно, что живой организм подчас оказывается более чувствительным и разборчивым, чем чувствительные физические инструменты, даже к таким ничтожным различиям в строении молекул, которые проявляются у зеркальноподобных веществ.

Так, существуют два аспарагина: левый и правый. Правый аспарагин имеет сладкий вкус, а левый—безвкусен. Существует два никотина—яда, которым систематически отравляют себя курильщики. Из этих двух никотинов один гораздо более ядовит, чем другой, и т. д.

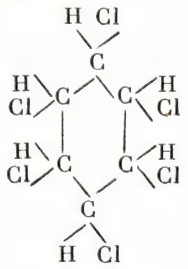
Таким образом, наше фантастическое путешествие в «мир зеркала» было не совсем фантастическим... Мы действительно можем частично воспроизвести этот мир и убедиться в верности наших предположений относительно его неожиданных и своеобразных свойств.



«Виновником» появления у веществ этого свойства — вращать плоскость поляризации—является так называемый асимметрический атом углерода. Он связан с четырьмя обязательно различными атомами или атомными группами. Если такой атом в молекуле есть, то существу-

ет и вращение плоскости поляризации. Формула показывает строение молекулы молочной кислоты, образующейся в прокисшем молоке, в квашеной капусте и огурцах. В ней легко обнаруживается асимметрический атом углерода (обозначен звездочкой), так как он связан с четырьмя отличными друг от друга группами атомов — CH_3, COOH, OH и H.

Но не всегда так просто обнаружить асимметрическое строение молекулы по структурной формуле вещества. Так, при действии на ярком свете хлора на бензол последний превращается в гексахлорциклогексан (или сокращенно—гексахлоран). Его формула



Это, быть может, самый драгоценный из подарков созидающей химии сельскому хозяйству. Проникая из почвы в ткани и соки растений, гексахлоран делает их инсектицидными, т. е. губительными для саранчи и других вредителей; для животных же и человека эти растения остаются безвредными.

Нам трудно догадаться, что под написанной выше структурной формулой гексахлорана в действительности скрывается не более и не менее как семь изомеров, в том числе и асимметрические изомеры. Особенно губителен для насекомых как раз один из асимметрических изомеров, на который приходится лишь 10—13% от общего веса гексахлорана.

С асимметрическими молекулами мы еще не раз будем встречаться. Поэтому нам и понадобилось совершить путешествие в мир, отраженный в зеркале.

ХИМИК В РОЛИ СТРОИТЕЛЯ

До сих пор химик выступал перед нами в роли архитектора. Познакомимся теперь с его деятельностью в качестве строителя, осуществляющего свой же собственный архитектурный замысел. Какие приемы он использует?

Приемов много! Некоторые носят имя исследователя, который изобрел их, например реакция Вюрца, реакция Арбузова.

Планируя синтез какого-либо нового вещества, химик избирает тот или иной из этих приемов, сообразуясь с известным ему строением молекул исходных веществ. Мы познакомимся в качестве примера с приемом, который получил особенное распространение в последнее время,— с полимеризацией.

Существуют целые классы веществ, молекулы которых обладают способностью самопроизвольно усложняться. Они как бы не удовлетворяются своей простотой и пользуются всяким случаем, чтобы путем сцепления друг с другом переходить во все более сложные сочетания с совершенно новыми свойствами.

Наиболее любопытный случай подобного самопроизвольного усложнения органических молекул произошел в 80-х годах прошлого века.

Потребность промышленности в каучуке уже тогда превзошла производительность рождающих его тропических растений. И ученый Тильден решил получить каучук искусственным путем. Трудность задачи заключалась в том, что точного представления о строении молекулы каучука еще не было. На основании некоторых соображений Тильден избрал в качестве исходного продукта летучий углеводород — изопрен. Но, каким воздействиям он ни подвергал его, ничего утешительного не получилось.

И вот в один прекрасный день ученому попалась на глаза пробирка, которую он забыл своевременно выплеснуть и вымыть. Он обнаружил в ней губчатую массу, которая оказалась великолепным каучуком. Вряд ли радость когда-либо сопровождалась таким огорчением: никаких записей об этой пробирке не осталось, и условий совершившегося в ней превращения установить не удалось.

Превращение изопрена в каучук — типичный пример полимеризации. В данном случае точно известно, что стремление к полимеризации у молекул появляется при наличии двойных связей.

Как правило, атом углерода бывает непосредственно связан с четырьмя атомами-соседями, атом кислорода — с двумя и т. д. Но бывает, что это правило не соблюдается. Например, у атома углерода мы иногда находим только трех соседей, у атома кислорода — только одного. В таких случаях обязательно обнаружится недостающее число соседей и у одного из атомов, непосредственно связанных с этим первым. Мы говорим тогда, что оба атома связаны друг с другом двойной связью.

Вот ее простейший пример — молекула этилена:

```
H   H
|   |
C = C
|   |
H   H
```

Двойные связи в молекулах обычно непрочны и стремятся уничтожиться. Это происходит, когда данное вещество вступает в реакцию с другими веществами. Но это бывает и без участия других веществ. Схема

```
H   H   H   H   H   H   H   H   H   H
|   |   |   |   |   |   |   |   |   |
C = C   C = C   C = C   C = C   C = C→
|   |   |   |   |   |   |   |   |   |
H   H   H   H   H   H   H   H   H   H
                    ↓
H   H   H   H   H   H   H   H   H   H
|   |   |   |   |   |   |   |   |   |
—C — C — C — C — C — C — C — C — C — C —
|   |   |   |   |   |   |   |   |   |
H   H   H   H   H   H   H   H   H   H
```

разъясняет, как путем сцепления друг с другом молекулы могут терять двойные связи и, наращивая звено за звеном, переходить в более устойчивые сложные формы. Химику остается только найти условия, при которых происходит полимеризация, и подобрать подходящий катализатор. Но это отнюдь не простая задача. Еще в 1910 г. русский ученый С. В. Лебедев продемонстрировал на заседании Русского физико-химического общества кусочек полученного им искусственного каучука. Однако понадобились десятилетия напряженной работы, чтобы можно было получать каучук по методу Лебедева на заводах. Это освободило нашу страну от необходимости ввозить натуральный каучук из тропических стран. А ведь каучук — не только галоши, прорезиненные плащи и детские мячи, без каучука немыслимы автомобиль и самолет.

С помощью реакции полимеризации производят не только каучук, но и разнообразные пластмассы, которые с каждым годом все шире входят в наш быт. Они известны нам в виде детских игрушек, гребней для волос, легких, красивых и прочных письменных принадлежностей. Но они же оказались незаменимыми материалами в электротехнике и машиностроении. Из них изготовляют диски сцепления в автомобилях, бесшумные шестерни, вкладыши подшипников прокатных станов и многое другое. Сырьем для производства пластмасс служат самые разнообразные природные материалы, начиная с древесины и кончая этиленом. Весьма типична и поучительна история появления на свет полиэтилена, называемого иногда «королем пластмасс».

Если вы попытаетесь вообразить простейшую органическую молекулу, в которой содержалась бы двойная связь, то неизбежно придете к молекуле этилена. Это пахучий газ, в изобилии образующийся в качестве отброса при переработке (крекинге) нефти и коксовании углей. Из каждой тонны нефти получается свыше 100 *кГ* этилена.

Сам этилен почти не находит полезного применения. (Впрочем, сейчас предпочитают во избежание порчи в дальней дороге снимать фрукты незрелыми и ускорять их дозревание искусственно, непосредственно перед продажей. Для этого на них в специальных камерах воздействуют этиленом. Но расход этилена на дозревание фруктов весьма незначителен).

И перед химиками встала задача превратить этот «отход» нефтяного производства в нужные продукты. Особенно заманчивым было использовать имеющуюся в этом веществе двойную связь для «сшивания» молекул этилена в длинные цепи (т. е. применить к этилену реакцию полимеризации). «На бумаге» эта реакция выглядела очень просто (см. ее схему выше, на этой же странице).

Но этилен оказался очень «неблагодарным» сырьем для получения молекул-гигантов. Первые успехи в полимеризации этилена были достигнуты лишь с помощью обычных помощников химика — высоких температур и давления. Его подвергли чудовищному давлению в 2000 *атм* одновременно с нагреванием до 200°С. Но для этого потребовались слишком сложные и дорогие аппараты и очень большой расход энергии. Почти два десятка лет были затрачены на упорные поиски, на то, чтобы осуществить полимеризацию этилена при атмосферном давлении в простых аппаратах. Были испробованы в качестве катализаторов сотни различных веществ. И созидающая химия победила! Из сотен опробованных катализаторов нашлись такие, которые вызывают полимеризацию этилена при обычном давлении и температуре всего в 60°С.

Так родился полиэтилен.

Бутылка из полиэтилена отличается от стеклянной меньшей прозрачностью. Он скорее напоминает парафин, и это не случайно. Парафин — выделенная из природной нефти смесь углеводородов с особо длинными цепями из углеродных атомов. Но в самом сложном из них — гектане — углеродная цепь слагается лишь из 100 звеньев.

А в молекулах полиэтилена содержатся десятки тысяч таких звеньев. Парафин настолько мягок, что его можно царапать ногтем, а полиэтилен тверд, подобно стеклу. Однако стекло хрупко, а полиэтилен гибок и упруг: молоток не разбивает полиэтиленовую бутылку, а отскакивает от нее, как от стали. Ни воздух, ни вода не действуют на него. Полиэтилен настолько легок, что плавает на воде. Он превосходный электроизолятор. Вот сколько в нем ценных качеств.

Эти свойства открыли полиэтилену широкую дорогу в производство кабелей высокого напряжения, радиолокационной и телевизионной аппаратуры, легких и прочных водопроводных труб, в машиностроение — для изготовления шестерен и зубчатых передач и т. д.—вплоть до флаконов для косметических товаров. Полиэтилен легко пилится, строгается, обтачивается, сверлится и штампуется на таких же станках, на которых обрабатываются металлы, «сваривается», размягчаясь струей нагретого воздуха. Химики могут быть спокойны: великий труд их, направленный на преодоление химической инертности этилена, не пропал даром!

ПОЛИМЕРЫ

Полимеры! Это слово за последние годы прочно вошло в язык советских людей, в круг их интересов, наряду с такими понятиями, как радиолокация, атомная энергия, термоядерная реакция, реактивное движение, межконтинентальная ракета, радиоэлектроника. Эти понятия олицетворяют науку и технику сегодняшнего дня.

И хотя полимеры, или высокомолекулярные химические соединения, принадлежат химии, рассказ о них мы начнем с другой области деятельности людей — с борьбы, осуществляемой нашей партией и советским народом, борьбы за быстрейшую победу нового общественного строя — коммунизма.

Весной 1958 г. в жизни нашей страны произошло событие, по своему значению сравнимое разве лишь с другим событием, случившимся давно — зимой 1920 г. Тогда, в самый разгар гражданской войны и иностранной интервенции, в обстановке невиданной разрухи и голода в стране, VIII Всероссийский съезд Советов рассмотрел и утвердил, казалось бы сугубо технический документ, план ГОЭЛРО— «Государственный план электрификации России».

«Коммунизм — это есть советская власть плюс электрификация всей страны»,— такими словами охарактеризовал великий Ленин основу будущего общественного строя нашей страны.

Следуя заветам Ленина, в мае 1958 г. Пленум Центрального Комитета КПСС принял решение по другому вопросу, тоже, казалось бы, непосредственно связанному только с наукой и техникой,— решение об ускорении развития химической промышленности и в первую очередь об увеличении производства искусственных волокон, пластических масс и других синтетических материалов и изделий из них для удовлетворения потребности населения и нужд промышленности.

В этом решении особое значение придается развитию самых важных разделов современной органической химии — химии искусственных волокон и пластических масс. Они таят в себе огромные ресурсы сырья для создания изобилия товаров народного потребления, высококачественных, добротных, охватывающих буквально все мыслимые и немыслимые еще области применения. В развитие одной только этой промышленности в ближайшее семилетие Советское государство вкладывает более 100 млрд. руб.

Состоявшийся в июне 1959 г. Пленум ЦК КПСС, посвященный ускорению технического прогресса в промышленности и строительстве и мероприятиям по внедрению комплексной механизации и автоматизации производства, обратил особое внимание на первоочередное оснащение оборудованием машиностроительной и химической промышленности, как базы для технического перевооружения всего народного хозяйства.

Эти решения показывают, по какому пути должна пойти химическая промышленность. Максимально возможная комплексная механизация и автоматизация химического производства, внедрение прогрессивной технологии помогут народному хозяйству добиться полного изобилия продуктов химии и в первую очередь синтетических веществ. Именно таким способом можно в кратчайший срок получить в любом количестве ткани более прочные, чем шелк и полот-

но, не боящиеся влаги, действия кислот, не мнущиеся при употреблении, обладающие целебными свойствами и многими другими необыкновенными качествами. Только синтетическая химия может дать материалы, не растворяющиеся в самых сильных кислотах и выдерживающие нагрев, при котором природные вещества сразу же обугливаются или сгорают. Эта новая отрасль химии создает материалы прочнее стали, легче пробки, эластичнее и выносливее каучука, более стойкие против действия времени и климата, чем дерево, кирпич и даже цемент. Синтетические масла́ не замерзают на самом трескучем морозе, а искусственные меха во много раз дешевле, прочнее, красивее, легче и износоустойчивее мехов самых редких животных.

Опираясь на практически неисчерпаемые источники угля, нефти, сланцев, природных газов, химическая промышленность уже к 1965 г. сможет производить новые искусственные вещества и материалы, полностью или частично заменяющие многие металлы, причем выпускать их будут столько, что это как бы удвоит существующую металлургическую базу.

Успешно соревнуясь с природой, химия создает «вторую природу»— совершенно новые, никогда и нигде не существовавшие вещества с самыми удивительными, необыкновенными свойствами, далеко превосходящими все, что способен дать живой и неживой мир.

Развитие современной химии достигло уже такой ступени, что на протяжении одного-двух десятилетий она одна сможет одеть, обуть, дать кров всему человечеству, не прибегая к благам живой природы!

В создании этой «второй природы» решающая роль принадлежит царице химии — органической химии и ее жемчужине — химии полимеров, или, как ее иначе называют, химии высокомолекулярных соединений.

МОЛЕКУЛЫ-ГИГАНТЫ

В то время как молекулы неорганических веществ состоят из немногих атомов, молекулы органических веществ могут состоять из десятков и сотен тысяч атомов.

Молекулы-гиганты! Огромные цепочки — полимеры, образованные из простых и совсем коротеньких звеньев — мономеров (рис. 1—цв. табл. на стр. 660). Из таких молекул-цепочек состоят и клетки живой материи — растений и животных.

На протяжении миллионов лет природные гигантские молекулы, или высокомолекулярные соединения, обеспечивали человека пищей, одеждой, теплом, кровом. Достаточно только оглянуться вокруг. Вот перед нами дерево. Его древесина состоит из полимеров, молекул-гигантов. Мясо и шерсть животных — опять полимеры. Углеводы и белки в зернах злаков — тоже полимеры. Волокна хлопка, шелка и великое множество других природных веществ — все это члены великой семьи полимеров.

На протяжении тысячелетий человек просто брал от природы все эти блага готовыми. Когда же человек во всеоружии приобретенного веками опыта обратился к веществам, из которых сложен органический мир, перед ним открылись неисчерпаемые и необъятные просторы. Свыше трех миллионов химических соединений знают теперь химики-органики.

И тем не менее высокомолекулярные соединения вплоть до недавнего времени представляли для химиков загадку, «книгу за семью печатями». Свои величайшие богатства природа создавала из самых сложных молекул, какие только можно себе представить.

Эти невероятно сложные структуры, выработанные в процессе развития живой материи, наделены исключительной живучестью и приспособляемостью к окружающим условиям, бесконечным разнообразием полезных свойств и качеств.

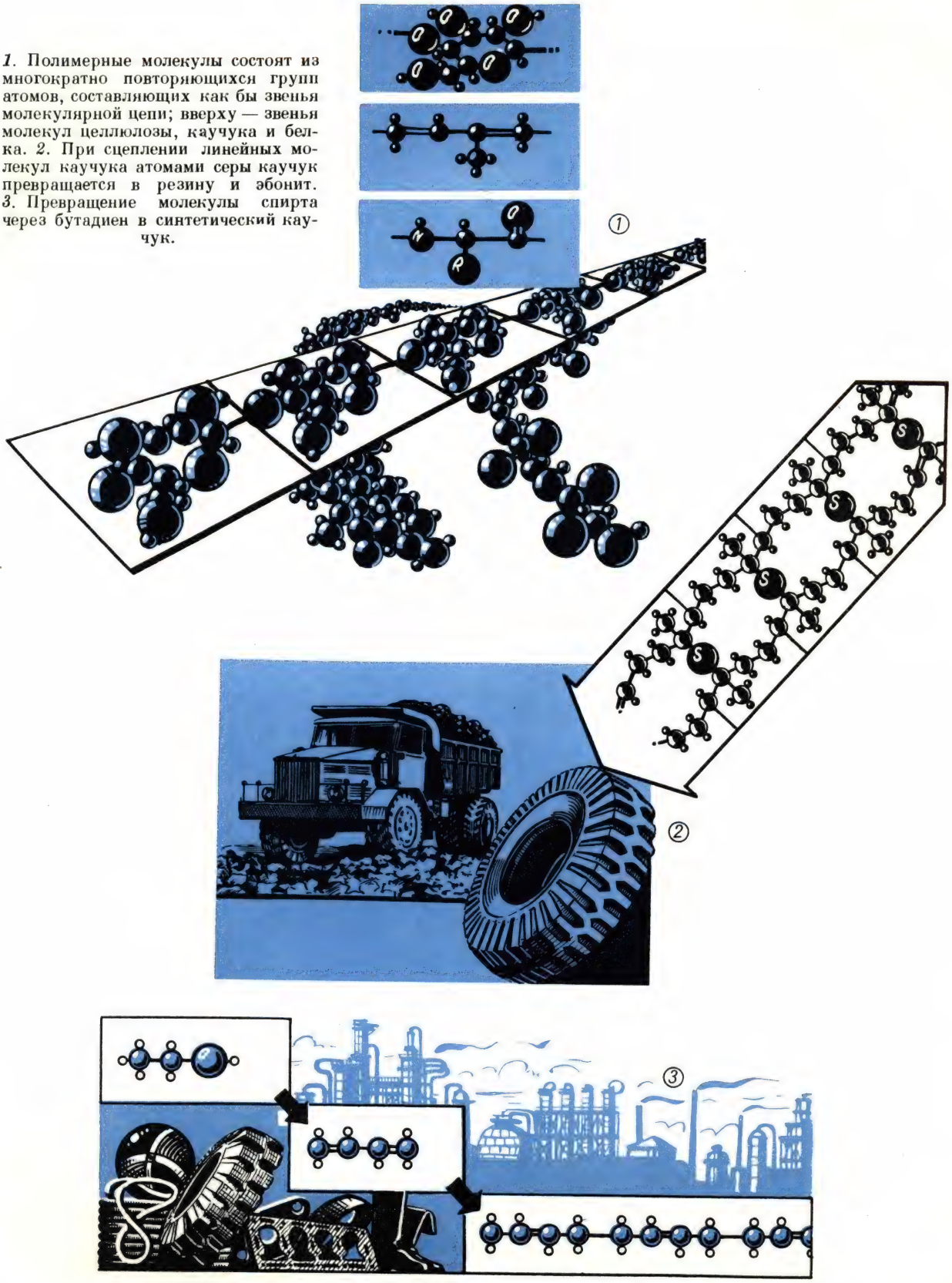
РОДОСЛОВНАЯ БОЛЬШИХ МОЛЕКУЛ

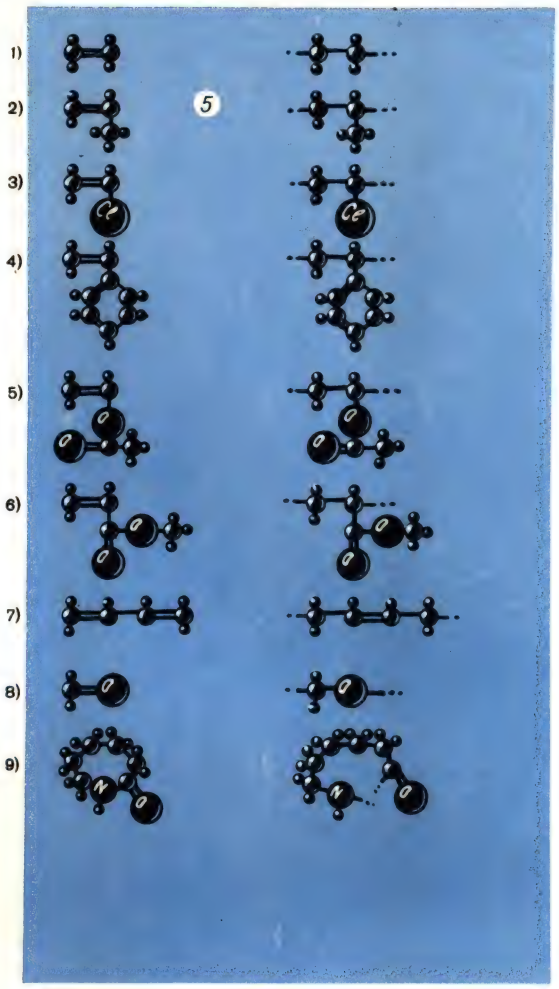
Попытки химиков разгадать тайны строения гигантских молекул были первым дерзким вызовом природе. Вслед за раскрытием тайн природных высокомолекулярных соединений химики должны были неминуемо придти к созданию новых веществ, которые природа не позаботилась произвести сама. Эти успехи не пришли сами собой. Они венчают более чем столетний период развития органической химии.

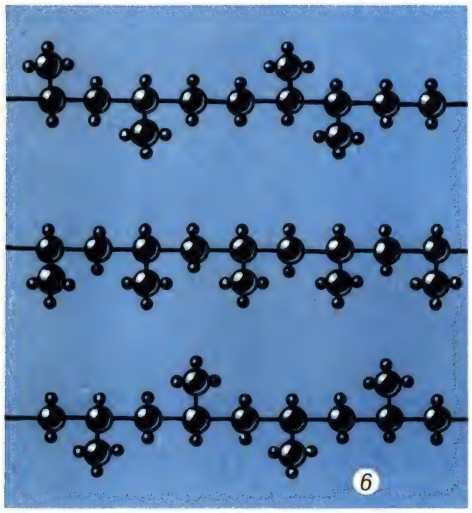
Впервые рука ученого поднялась на сокровеннейшую тайну химического строения живой материи в начале прошлого века, когда немецкому химику Ф. Вёлеру первому удалось синтезировать в пробирке органическое вещество — мочевину (NH_2CONH_2).

С течением времени структурная теория позволила установить строение и разложить по «полочкам» сотни тысяч различных веществ— от простейшего природного газа метана до змеи-

1. Полимерные молекулы состоят из многократно повторяющихся групп атомов, составляющих как бы звенья молекулярной цепи; вверху — звенья молекул целлюлозы, каучука и белка. *2*. При сцеплении линейных молекул каучука атомами серы каучук превращается в резину и эбонит. *3*. Превращение молекулы спирта через бутадиен в синтетический каучук.







4. Из фенола (слева) и формальдегида (справа) получается бакелит. *5*. Важнейшие мономеры: против каждого изображено отвечающее ему звено полимера, образующееся при размыкании двойной связи в мономере: 1) этилен, 2) пропилен, 3) хлорвинил, 4) стирол, 5) винилацетат, 6) метилакрилат, 7) дивинил, 8) формальдегид, 9) ε-капролактам. *6*. Вверху — атактический полипропилен, в середине — изотактический полипропилен, внизу — синдиотактический полипропилен. 7. Пример реакции конденсации — превращение целлюлозы действием азотной кислоты в нитроцеллюлозу; «отход» — вода.

ного яда. После этого многочисленная армия химиков-органиков сосредоточила свои силы на борьбе за создание органических веществ искусственным путем: синтетических красителей, лекарств, духов, топлива и многого, многого другого. При этом сокровенной мечтой каждого химика было получение нового вещества в виде красивых кристаллов. Когда в ходе тех или иных реакций вместо кристаллов случайно получались высокополимерные вещества, химики испытывали большое огорчение. И было отчего огорчаться. Стенки их колб покрывались липкой смолистой или резиноподобной грязью, которую ничем нельзя было ни отмыть, ни удалить. Дело кончалось тем, что посуду выбрасывали вместе с содержимым. Поэтому химики всячески избегали иметь дело со смолами. И лишь отдельных энтузиастов интересовали эти химические «золушки».

Первые попытки установить химический состав целлюлозы (основное вещество древесины), каучука и даже белка относятся к концу XIX в. Эти вещества, как и все остальные органические соединения, состоят из очень немногих видов атомов, главным образом из углерода, водорода и кислорода. Так, целлюлоза — вещество совершенно неплавкое и ни в чем не растворимое — сходна по химическому составу с легкорастворимым и плавящимся сахаристым веществом — глюкозой.

Основная особенность упомянутых веществ не в составе, а в размере их молекул. Это подтверждается хотя бы тем, что способность растворяться и плавиться, присущая обычным органическим веществам, например различным углеводородам, содержащимся в нефти, непрерывно уменьшается по мере увеличения количества атомов в их молекулах.

Отсюда высокая механическая прочность волокон хлопка (целлюлоза) и шерсти (белок) и совсем уж удивительная крепость волокон шелка. Нити этих веществ состоят из очень больших, прочно сцепленных друг с другом молекул. А так как в состав этих молекул входит лишь очень ограниченное количество видов атомов, то химики вполне логично предположили, что такие гигантские молекулы состоят из периодически повторяющихся отдельных «кирпичиков», которые сами по себе имеют небольшие, «нормальные» размеры. Так оно на самом деле и оказалось. Гигантская молекула целлюлозы, например,— это как бы цепочка из молекул глюкозы. Молекула каучука состоит из набора молекул изопрена, а молекула одного из простейших видов белка — как бы из молекул аминокислот. Именно по этой причине таким веществам химики стали давать названия с приставкой «поли» («много»). Целлюлозу, например, стали называть полисахаридом, подчеркивая этим, что она образована из многих молекул сахара.

Когда такая молекула имеет очень большие размеры, то вещество называют уже высокополимерным.

Так родилась современная терминология химии гигантских молекул (высокомолекулярных соединений). Точное знание химической структуры большинства известных полимеров пришло значительно позже. Однако это уже не могло служить препятствием для искусственного получения из них новых высокомолекулярных веществ. Были найдены практические способы превращения целлюлозы в так называемый ацетатный шелк, в пленку для кино, красивые блестящие лаки и краски, игрушки.

Другой быстро развивающейся областью промышленности стало производство резиновых изделий. Оно начало расти после того, как в начале XIX в. Ч. Гудьир открыл способ превращения каучука в резину путем вулканизации, т. е. нагревания каучука вместе с серой (рис. 2—цв. табл. на стр. 660). Это придавало каучуку прочность и твердость. А в начале XX в. бурными темпами стала развиваться автомобильная промышленность, которая в настоящее время поглощает более 85% резины во всем мире.

Более скромной была область применения белков и углеводов, используемых в качестве сырья для искусственной кожи, клеев, и даже казеиновых (казеин — основа творога) пластических масс, из которых делали гребешки, посуду, украшения и т. п.

ПЕРВЫЕ ИСКУССТВЕННЫЕ ПЛАСТМАССЫ

В науке, особенно русской, всегда находились ученые, заглядывавшие на десятилетия, а иногда и на целые века вперед и не находившие в своих гениальных догадках поддержки официальной науки и властей. Так было и с первооткрывателями синтетических высокомолекулярных веществ. Великий русский химик А. М. Бутлеров еще в середине XIX в. первым открыл принципы их получения из низкомолекулярных соединений (полимеров из мономеров) при помощи реакции полимеризации (см. стр. 657—658).

Эти работы оказали огромное влияние на все дальнейшее развитие химии. В 1909 г., применяя методы Бутлерова, С. В. Лебедев пытался из бутадиена (газообразного продукта, получающегося из спирта) создать новые полимерные вещества и получил нечто очень сходное с естественным каучуком (рис. 3— цв. табл. на стр. 660). После Октябрьской революции ему удалось впервые в мире создать искусственный каучук (СК). В 1931 г. у нас в стране было организовано его промышленное производство.

В начале XX в. произошло и другое событие, резко изменившее отношение химиков к веществам, до этого только загрязнявшим лабораторную посуду. Молодой бельгийский химик Х. Бэкеланд неожиданно заинтересовался вязкой жидкостью, образующейся в результате реакции между двумя давно известными веществами — фенолом и формальдегидом,— растворенными в воде.

Однажды, нагревая эту жидкость под давлением, он неожиданно получил твердое и прозрачное вещество, которое оказалось носителем целого ряда чрезвычайно полезных свойств.

Это вещество прекрасно выдерживало высокую температуру, не растворялось в воде, было очень устойчиво против действия различных химических веществ. Оно хорошо противостояло механическому износу, не боялось влаги и в довершение всего оказалось великолепным изолятором электрического тока.

Так родился новый материал, названный в честь его создателя «бакелитом» (рис. 4— цв. табл. на стр. 661). А вместе с ним появилась и новая область промышленности — индустрия пластиков и пластических масс.

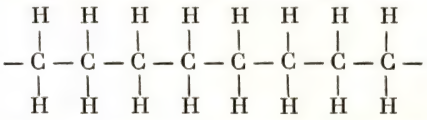
Последователям Бэкеланда очень скоро удалось создать новые, не менее интересные и полезные материалы примерно такого же типа. Нагревая под давлением формальдегид, а вместо фенола мочевину или анилин, химики получили ряд новых пластмасс.

Чего только нельзя было изготовить из этих первых промышленных полимеров, синтезированных, так сказать, ощупью, чисто опытным путем! Законов, управляющих их образованием и поведением, никто из первых исследователей не открыл, да и не пытался этого сделать. По сути дела им было некогда. Новые изделия нашли большой спрос, фабриканты требовали только одного ответа — «как», а не «почему».

Но без «почему» нельзя было создавать новые, еще более совершенные материалы, улучшать качество продукции, уменьшать ее стоимость, упрощать производственные процессы. Волей-неволей пришлось по-настоящему заняться изучением полимеров. И результаты не замедлили сказаться.

СЕКРЕТ ПРОЧНОСТИ

Почему именно молекулы органических веществ стремятся соединяться в длинные цепочки, включающие в себя десятки и сотни тысяч молекул-мономеров? Причина кроется в исключительной прочности валентных связей атомов углерода. Возьмем цепочку полиэтилена:

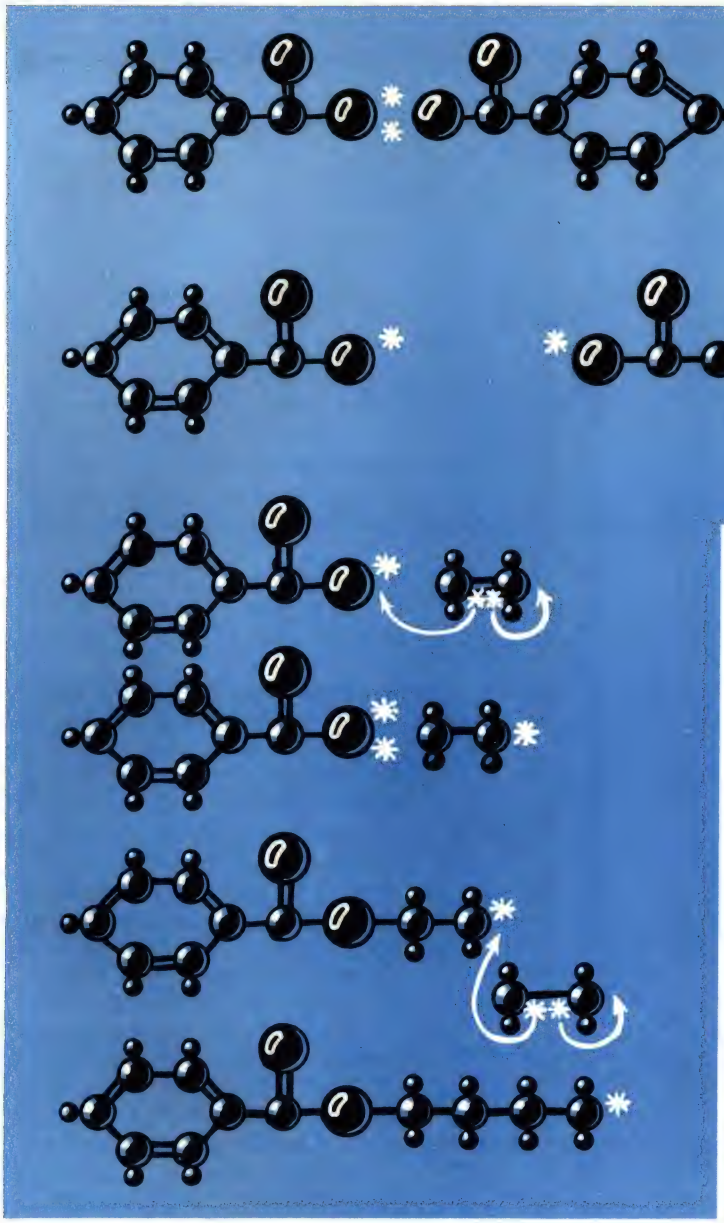


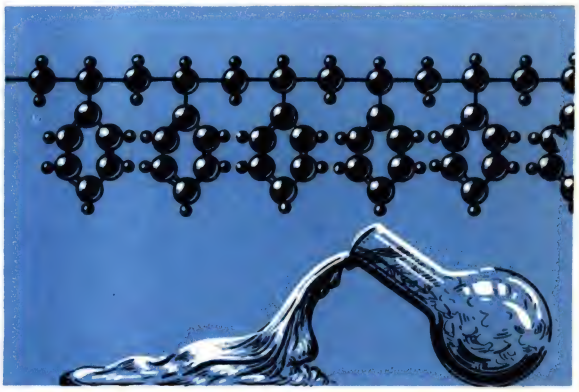
Эти звенья прочно «сшиты» между собой валентными связями углерода. В свою очередь метиленовые звенья двух соседних молекул тоже притягиваются друг к другу, но довольно слабо: для того чтобы разорвать химическую, валентную связь между двумя углеродными атомами, нужно затратить примерно в 160 раз больше энергии, чем для того, чтобы переместить относительно друг друга два метиленовых звена. Поэтому оторвать одну от другой обычные, малые молекулы, например расплавить вещество, которое они образуют, или просто разъединить их механическим путем куда легче, чем разорвать саму молекулу.

А вот в гигантской молекуле все оказывается наоборот. Ведь чтобы переместить две такие молекулы относительно друг друга, нужно энергию связи двух метиленовых звеньев умножить на общее количество метиленовых звеньев во всей цепочке полимера! А их может быть несколько десятков тысяч. В этом случае становится куда легче разорвать саму молекулу, чем оторвать две молекулы друг от друга (подробнее о причинах прочности пластмасс и других высокомолекулярных соединений см. статью «Молекулярное строение вещества»).

Выше речь шла об одной, отдельно взятой гигантской молекуле. Но в любом, даже ничтожно малом, количестве вещества их превеликое множество. И от того, как они располагаются друг относительно друга, зависят и свойства вещества. Цепочки могут располагаться прямолинейными параллельными пучками, вроде проводов в телефонном кабеле. Тогда веще-

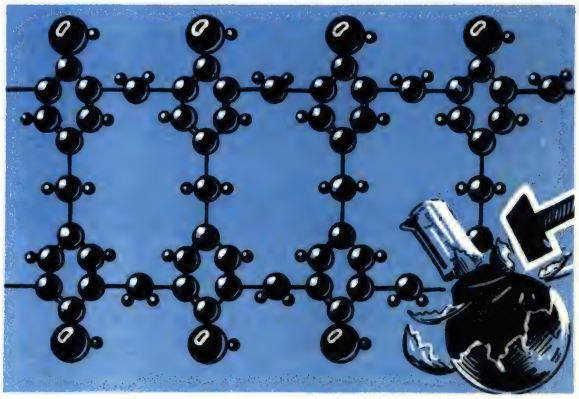
8. Механизм радикальной полимеризации — образование полиэтилена из этилена при участии в качестве инициатора перекиси бензола. Электроны, участвующие в образовании новых связей, изображены звездочками, перемещения их — стрелками. Первая ступень — молекула перекиси расщепилась на два радикала. Вторая ступень — молекула этилена присоединилась к радикалу — цепная реакция началась. Третья ступень — к активному (правому) концу нового радикала присоединилась следующая молекула этилена — началось нарастание цепи звено за звеном.

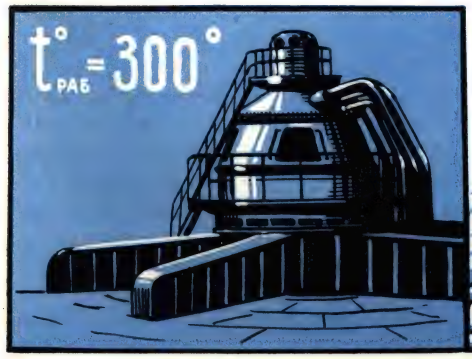




9

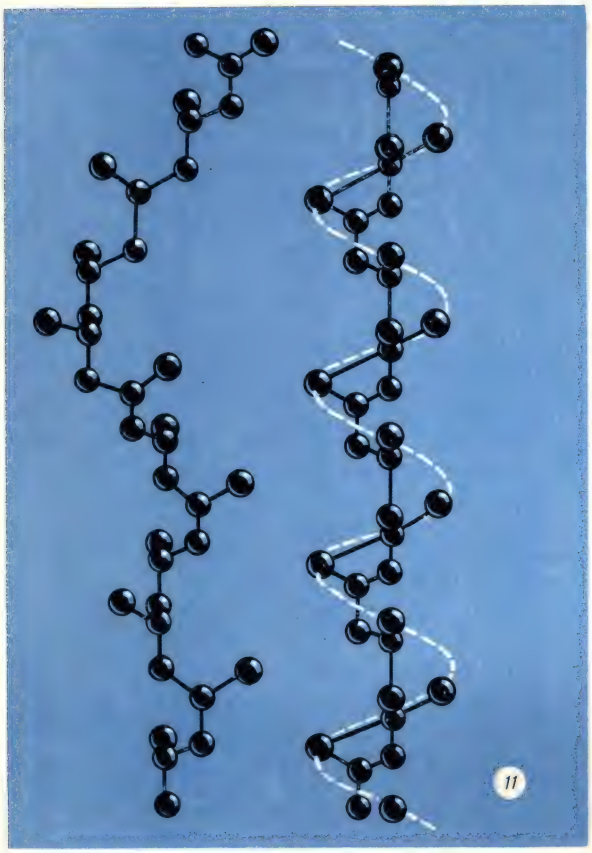
9а





10

9 и *9а.* Термопластическая смола (вверху), термореактивная смола (внизу). *10.* Из силикона делают электроизоляцию, выдерживающую высокие температуры.



11. Строение углеродного скелета атактического (слева) и изотактического (справа) высокополимеров. *12.* «Прививка» одного полимера к другому напоминает прививку растения в садоводстве. *13.* Предметы, изготовленные из силоксанов; слева — образец структуры силоксанов.

ство приобретает свойство прочных, эластичных волокон или гибкого твердого тела. Когда же молекулы свертываются в клубки, вещество приобретает способность сильно растягиваться, вроде всем хорошо знакомого каучука. Внешние силы, действуя на него, растягивают врозь, распрямляют перевитые в хаотическом беспорядке клубки гигантских молекул каучука. Но, как только внешние силы исчезают, молекулы снова скручиваются в клубки, и каучуковое изделие с силой возвращается к своей прежней форме.

Представьте себе клубок из отрезков витой стальной проволоки. Если к нему подвесить грузик, клубок растянется. Если грузик снять, клубок вновь сожмется.

Можно сказать, что высокомолекулярные соединения могут счастливо сочетать в себе упругость, свойственную газообразным веществам, текучесть, тепловое расширение и сжимаемость, присущие жидкостям, и сопротивляемость любому изменению их формы, характерную для твердых тел.

В каучуках, пластмассах, клеях весьма различно проявляются необычные и неожиданные сочетания физических свойств. Они могут быть твердыми и мягкими, хрупкими и прочными, упругими и гибкими, похожими на кожу или на резину.

Некоторые полимеры способны течь, как жидкости, и одновременно обладают огромной вязкостью, в миллион раз большей, чем самые вязкие вещества, например масла́. При медленном механическом воздействии на них такие полимеры страшно податливы — легко деформируются и как бы текут. При быстром воздействии они сопротивляются, как самая упругая резина, а при очень быстром воздействии ведут себя уже как хрупкое твердое тело.

КАК ПОЛУЧАЮТСЯ МОЛЕКУЛЫ-ГИГАНТЫ

Одно дело разгадать, как устроен природный полимер, а другое — воспроизвести его или похожий на него полимер искусственным путем, т. е. «сковать» составляющие его звенья в длинную цепочку. Как и при помощи чего можно осуществить такое «волшебство»?

Химик, собирающийся воспроизвести или создать заново гигантскую молекулу, чем-то напоминает строителя, задумавшего построить новое здание. При этом вместо отдельных кирпичей в распоряжении строителя могут быть крупные блоки различной величины и формы. У химика, правда, эти блоки невидимы: они невероятно малых размеров.

Самые простые и удобные звенья для создания цепочек — мономеры, имеющие форму веточки из двух и более углеродных атомов с выступающими по бокам атомами водорода, при условии, что внутри молекулы есть двойные или тройные связи. Атомы в молекуле мономера могут располагаться и в виде колец. Тогда двойные связи могут оказаться не обязательными.

Мономеров существует превеликое множество, и наш «архитектор»-химик может располагать бо́льшим числом сортов строительных кирпичей и блоков, чем архитектор-строитель.

Молекулы мономеров показаны на рис. 5 (цв. табл. на стр. 661). Простейший из них — газ этилен. Многие другие важные мономеры представляют собой тот же этилен, в котором один из атомов водорода замещен на тот или иной радикал.

Но выбором мономеров планирование «архитектуры» будущих молекул-гигантов не ограничивается. Молекулы этилена, в каком бы порядке их ни соединяли друг с другом, дают полимер, отличающийся от мономера только своей огромной длиной. Такая структура, вообще говоря, особо благоприятна для получения волокнистых веществ.

Картина значительно усложняется, когда на место одиночного водородного атома сбоку цепочки присоединена целая группа атомов, как, например, у пропилена. Цепочка полимера, «собранного» из таких мономеров, может принять уже три различных вида: мономеры соединены как попало, и их боковые группы «смотрят» в любые стороны; боковые группы расположены все по одну сторону цепочки полимера (такие полимеры называются и з о т а к т и ч е с к и м и); боковые группы располагаются по обеим сторонам цепочки, но в каком-то определенном порядке (рис. 6 — цв. табл. на стр. 661).

Теперь нетрудно представить себе, какое огромное количество вариантов цепочек можно составить, имея в своем распоряжении столь богатые возможности комбинировать расположение мономеров в цепочке полимера!

Цепочки, у которых все боковые группы мономеров направлены в одну сторону («изо»), легко размещаются параллельно друг другу и образуют частично кристаллическую структуру. А цепочки с беспорядочным размещением боковых групп более характерны для аморфных (стекловидных) структур вещества.

Блоки различных полимеров, в свою очередь, тоже могут соединяться друг с другом в цепочку, наподобие мономеров. Наконец, в качестве боковых отростков на месте групп атомов мономеров могут оказаться целые полимеры.

И каждое такое изменение в структуре полимера означает какое-то определенное изменение в механических или иных его свойствах.

«ШВЕЙНАЯ ФАБРИКА» ДЛЯ ГИГАНТСКИХ МОЛЕКУЛ

Молекулы мономеров сами по себе никак не соединяются. Ведь у них нет ни рук, ни крючков, ни магнитиков, ни электрических зарядов, с помощью которых они могли бы самопроизвольно соединяться друг с другом.

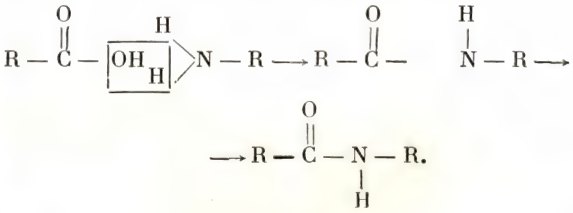
Значит, надо их заставить соединяться, «ввернуть» в концы молекул по «крючочку». Для этого существует два основных способа: поликонденсация и полимеризация. Оба они требуют обычно нагревания, причем часто приходится применять высокие давления и катализаторы-инициаторы.

В результате такого объединенного энергичного воздействия мономеры или группы мономеров претерпевают перестройку. Атомы их, расположенные на концах молекул исходных веществ, приобретают «крючочки», т. е. приобретают способность связываться, сцепляться друг с другом, как сцепляется поезд на сортировочной станции: вагон за вагоном (рис. 5 — цв. табл. на стр. 661).

ПОЛИКОНДЕНСАЦИЯ

Процесс поликонденсации протекает в виде сложной химической реакции с выделением в качестве своеобразных «отходов» некоторых низкомолекулярных веществ — обычно воды, аммиака и т. п. Именно этим поликонденсация отличается от полимеризации, при которой исходный продукт превращается в конечный целиком, без всяких «отходов».

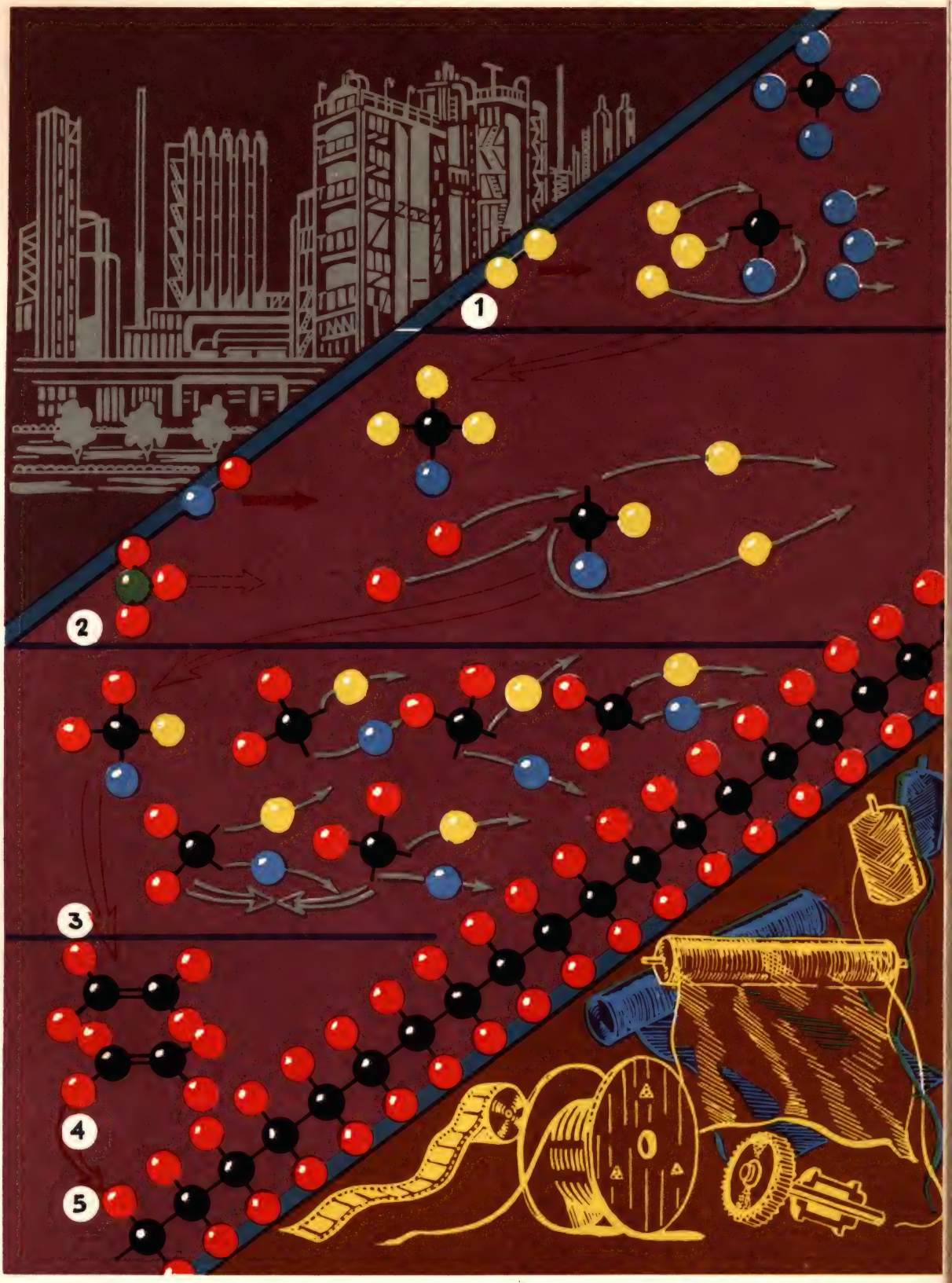
«Сцепление» при поликонденсации происходит за счет отщепления подвижных атомов или групп атомов из входящих в молекулу функциональных групп. К числу таких групп в органических молекулах относятся аминогруппа (NH_2), от которой может отщепляться атом водорода, и карбоксильная группа (COOH), от которой сравнительно легко отрывается гидроксильная группа OH. Это происходит, когда молекула с карбоксильной группой встречается с молекулой, наделенной аминогруппой, так как атом водорода, отрывающийся от аминогруппы, в этом случае получает возможность соединиться с гидроксильной группой в прочную молекулу воды:



При этом у первой молекулы освобождается связь при атоме углерода, а у второй — при атоме азота. Через эти связи молекулы и смыкаются друг с другом.

Если в каждой молекуле имеется лишь по одной функциональной группе, этим все и кончается. Такой тип химических реакций мы называем конденсацией. Если же в молекулах содержится не менее чем по две функциональ-

Таблица 45. Получение фторопласта («тефлона»). Основным сырьем для производства фторопласта является газ метан, молекула которого состоит из одного атома углерода (черный кружок) и четырех атомов водорода (голубые кружки). Чтобы получаемое вещество обладало высокой теплостойкостью и устойчивостью против действия самых сильных химических реактивов, в молекуле метана атомы водорода нужно заменить атомами фтора. Однако сразу это сделать нельзя. Сначала метан подвергается хлорированию. При этом из молекулы метана «выбиваются» три атома водорода, а на их места становятся атомы хлора (желтые кружочки), в результате чего получается молекула хлороформа (1). Хлороформ подвергают действию веществ, содержащих фтор, например фтористого водорода, который является еще более энергичным реагентом, чем хлор. В молекуле хлороформа при этом два атома хлора замещаются двумя атомами фтора. Получается молекула дифторхлорметана, состоящая из атома углерода, двух атомов фтора и по одному атому водорода и хлора (2). Теперь можно приступить к созданию тетрафторэтилена — исходного мономера, необходимого для производства гигантской молекулы фторопласта. Для этого дифторхлорметан нагревают до высокой температуры, в результате чего его молекулы теряют относительно слабо связанные с ними атомы хлора и водорода (3). Образовавшиеся осколки молекул, состоящий каждый из одного атома углерода и двух атомов фтора, с огромной энергией соединяются друг с другом, образуя молекулу тетрафторэтилена (4). Процесс полимеризации этого мономера ведется при повышенной температуре и под давлением с использованием в качестве катализатора перекиси водорода, в результате чего получается фторопласт (5) — новое искусственное пластическое вещество, обладающее целым рядом замечательных свойств.

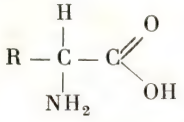

1
2
3
4
5

ные группы, появляется возможность присоединения к получившейся «двойной» молекуле новых и новых звеньев за счет ввода в действие новых и новых функциональных групп, иначе говоря, возможность безграничного роста молекулы.

Итак, необходимой (однако недостаточной) предпосылкой для реакции поликонденсации является наличие в исходных молекулах не менее чем по две функциональные группы, такие, как аминогруппа или карбоксильная группа. Заметим, кстати, что эти же группы используются при построении молекул красителей для той же самой, по существу, цели — чтобы образовать сцепление между молекулой красителя и окрашиваемым волокном (см. стр. 688). Такую же роль и при крашении волокон красителями и при реакциях поликонденсации могут играть и другие функциональные группы, например группа OH.

Предположим, задумано осуществить поликонденсацию двух веществ. Молекулы одного из них имеют на обоих своих концах основную аминогруппу NH_2, другого — кислотную группу карбоксил COOH, хотя молекулам не обязательно иметь на обоих своих концах одинаковые группы: с таким же успехом они могут быть и разными. Молекулы будут реагировать друг с другом только одним способом: аминогруппа одного мономера с карбоксилом другого. При этой реакции выделится вода.

Так, например, получается полимер синтетического волокна типа нейлона. «Чертежом» для него была взята структура естественных полимеров — шерсти и шелка, которые образованы путем именно такого сцепления. Только у шерсти и шелка аминогруппа и карбоксил содержатся не в разных исходных молекулах, а в одной и той же молекуле — молекуле аминокислоты:



Аминогруппа — на одном конце, карбоксил—на другом. Не удивительно, что нейлоновое волокно и по внешнему виду, и по свойствам очень похоже на шелк.

Процесс поликонденсации имеет тот недостаток, что он не дает возможности «вырастить» очень большие молекулы.

К счастью для создания ряда полимеров (к примеру, того же нейлона) вполне достаточно молекулы, составленной из 10—20 тысяч мономеров.

Метод поликонденсации позволяет получать такие очень важные вещества, как ф е н о л ь н о ф о р м а л ь д е г и д н ы е, к а р б а м и д н ы е и м е л а м и н ф о р м а л ь д е г и д н ы е с м о л ы. Они применяются в качестве клеев или связующих веществ при производстве фанеры, электроизоляционных изделий, пенопластов, материалов, в которые входят древесные опилки, и т. д.

Реакция двухосно́вных кислот с диаминами — $R(NH_2)_2$, или гликолями—$R(OH)_2$ дает очень важные исходные полимеры — п о л и а м и д ы и п о л и э ф и р ы. Из этих полимеров после дальнейшей переработки изготовляют исключительно прочные волокна: а н и д, н е й л о н и л а в с а н.

Из всех этих веществ получаются превосходные пленки, которые почти не пропускают газа и более прочны, чем алюминиевая фольга одинаковой с ними толщины. Поэтому их широко применяют для изоляции электрических проводов, упаковки пищи и товаров, изготовления баллонов, и даже для застекления рам в парниках.

Из угольной кислоты и некоторых фенолов получают п о л и э ф и р ы — весьма теплостойкие полимеры (п о л и к а р б о н а т ы). Их используют в производстве прочных и одновременно теплостойких (до 250°C) пленок, волокон и пластмасс.

ПОЛИМЕРИЗАЦИЯ

Процесс полимеризации позволяет получать гигантские молекулы практически любой длины — цепочки в сотни тысяч и даже миллионы составных звеньев. По сравнению с поликонденсацией этот процесс более прост, но зато труднее поддается управлению. Если в поликонденсации участвуют молекулы, на концах которых уже заранее есть «крючочки»,

Таблица 46. Предметы, сделанные из различных синтетических материалов. Справа показаны части молекул следующих веществ: полиэтилена, полистирола, полиметилметакрилата, поливинилиденхлорида, синтетического каучука (черными кружками обозначены атомы углерода, коричневыми — водорода, красными — кислорода, зелеными — хлора).

с помощью которых они соединяются в цепочки полимеров, то в процессе полимеризации эти «крючочки» создаются в тот момент, когда каждый мономер становится на свое место в цепочке.

Достигается это разными путями, однако все они требуют присутствия инициатора. В отличие от обычного процесса катализа при полимеризации инициатор расходуется.

В качестве инициатора применяют свободные радикалы — осколки более крупных молекул, разрушенных в результате нагревания. Такой свободный радикал, имея на орбите одного из составляющих его атомов лишний электрон, химически очень активен и способен прочно соединяться с некоторыми мономерами. У концевого атома мономеров благодаря этому появляется свой свободный электрон, они сами становятся свободными радикалами и в свою очередь присоединяют следующие мономеры.

Мономеры один за другим нанизываются в цепочку полимера, а свободный (непарный) электрон, присоединив к цепочке очередной мономер, как бы переходит на его конец, чтобы присоединить следующий, и т. д. (рис. 8—цв. табл. на стр. 662).

Таким путем создаются полиэтилен, полистирол, полихлорвинил. Их гигантские молекулы могут быть линейными, могут иметь боковые ответвления. Последнее происходит в том случае, когда свободный радикал начинает присоединяться не к концу длинной цепочки полимера, а где-то сбоку. Это бывает, если процесс полимеризации ведется при высокой температуре. Такое строение, например, приобретает полиэтилен, когда он полимеризуется при давлении в 1000 *атм* и температуре 200—300°.

В нашу задачу не входит изложение здесь всех возможных способов полимеризации или тонкостей использования самых разнообразных катализаторов и инициаторов. Нам хотелось только показать «архитектурную сторону» строения полимеров и то, с чем должен считаться химик, когда он составляет план получения нового искусственного вещества. В таком веществе иногда должны сочетаться самые необычные, а подчас и невероятные, но очень нужные человеку свойства, каких никогда еще не создавала природа.

Мы уже упоминали о том, что не все мономеры сразу, без предварительной перестройки, пригодны для создания требуемых полимеров. Поэтому чаще всего их приходится видоизменять, перестраивать и только после этого приступать к «сшиванию» в длинные цепочки.

Путем полимеризации газа этилена производится твердое вещество — полиэтилен. Из него изготовляют большое количество разнообразных пластических масс и пленок, отличающихся химической стойкостью, влагонепроницаемостью, а также прекрасными электроизоляционными свойствами.

Заменив в этилене атомы водорода другими атомами или группами, можно получить мономеры, из которых, оказывается, значительно легче создавать новые полимеры, чем из самого этилена. Таков, например, поливинилхлорид — прекрасный материал для изоляции электрических проводов, для химически стойких прокладок, искусственной кожи и легких пенопластов.

Вводя в этилен на место атомов водорода атомы фтора, получают фторопласты. Они отличаются исключительной теплостойкостью (до 300°) и несравнимой ни с какими другими веществами химической стойкостью. Полиметилметакрилат (известный всем под названием плексиглас) применяется для производства небьющегося стекла, прозрачной брони. Он соединяет в себе идеальную прозрачность лучших сортов силикатного стекла с необычайной легкостью и упругостью стали. Полистирол — самый лучший из известных диэлектриков.

КАК ПОЛУЧАЮТ ФТОРОПЛАСТ

Чтобы уяснить, как все эти «таинства» происходят на деле рассмотрим последовательность создания новой искусственной пластической массы — фторопласта (тефлона). Здесь мы намеренно выбрали один из самых сложных и хитроумных процессов с тем, чтобы более наглядно показать методы и приемы, которые применяет современная химия высокомолекулярных соединений. Ведь в этом случае химики заранее задались целью получить вещество, которое обладало бы набором самых необычных качеств, каких вообще не бывает в окружающей нас природе (см. цв. табл. на стр. 664).

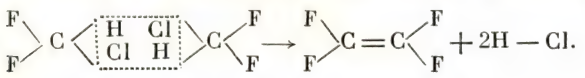
Для синтеза фторопластов используется газ метан. Он в изобилии имеется в природе. Его также получают при переработке сырой нефти в различные виды топлива. Молекула этого газа состоит из одного атома углерода, удерживающего около себя четыре атома водорода (CH_4).

Для того чтобы конечный продукт был теплостоек, устойчив против действия самых сильных химических реактивов и обладал многими другими достоинствами, молекулы метана надо перестроить, перекроить, сшить в длинные цепочки и провести еще ряд сложных операций.

Прежде всего из молекулы метана нужно удалить атомы водорода и заменить их атомами фтора. Но сразу сделать это нельзя. Сначала метан подвергают действию такого сильного реагента, как хлор. В результате химической реакции из атома метана удаляются три атома водорода и на их места становятся три атома хлора. Один атом водорода в молекуле сохраняется. Это необходимо, чтобы могли произойти последующие преобразования молекулы. Из молекулы метана получилась молекула хлороформа ($CHCl_3$). Затем хлороформ подвергают действию фтористого водорода. Теперь из молекулы хлороформа удаляются два атома хлора, и на их места становятся два атома фтора. В результате мы получаем молекулу вещества, называемого дифторхлорметаном (CHF_2Cl). Она содержит два атома фтора, один хлора, один углерода и один водорода.

Итак, атомы фтора успешно заняли в молекуле этилена места атомов водорода. Сейчас уже можно приступить к созданию тетрафторэтилена — исходного мономера, необходимого для постройки задуманного полимера.

Настало время удалить из молекулы «вспомогательные» атомы хлора и водорода, которые тяготеют друг к другу и стремятся соединиться в молекулу HCl. Это может произойти, однако, лишь за счет взаимодействия двух молекул дифторхлорметана, так как иначе в молекуле CHF_2Cl остались бы ненасыщенные валентности у атома углерода. Взаимодействие же двух молекул происходит следующим образом:



Вот в молекуле и появилась двойная связь.

Заготовка исходного вещества закончена, и сейчас уже можно приступить к «сшиванию» полученных мономеров в полимер—гигантскую цепную молекулу фторопласта — политетрафторэтилена. Процесс «сшивания» (полимеризация) ведется при высоких температурах и давлениях, а для его ускорения в реактор вводят инициатор, например некоторые перекисные соединения (перекись водорода и др).

Наконец, процесс создания фторопласта окончен. Он имеет вид белой твердой массы, сохраняющей свои свойства в пределах температур от —6 до +350°, а это необыкновенные свойства.

На фторопласт не действуют ни щелочи, ни кислоты, его не растворяет даже так называемая «царская водка»— смесь соляной и азотной кислот,— растворяющая даже благородные металлы: золото и платину. Поэтому фторопласт, или, как его называют, «органическая платина»,— это идеальный материал для любой химической посуды, труб и аппаратуры. Кроме того, сегодня это самое скользкое вещество в мире. Небрежно положенная на стол или стул пленка или ткань из фторопласта может буквально «убежать» или «стечь» на пол. Если скользящую поверхность лыж подбить такой пленкой, то скорость спуска с горы резко увеличивается. Фторопластовые подшипники в ряде приборов и машин могут работать без смазки! Фторопласт — прекрасный диэлектрик, обладающий к тому же исключительно высокой теплостойкостью. Защищенные им электрические провода и обмотки могут без вреда для себя выдерживать нагрев до 400°С— температуры, при которой плавится свинец.

СТЕКЛО, КОЖА ИЛИ РЕЗИНА?

Все полимеры можно разделить на две большие группы: совершенно аморфные (однородные) полимеры, похожие, например, на стекло, и полимеры с частично кристаллической (упорядоченной) структурой.

Сначала остановимся на группе аморфных полимеров.

В них молекулярные цепочки переплетены друг с другом в самых причудливых и беспорядочных комбинациях. При таком внутреннем структурном беспорядке аморфные полимеры напоминают скорее жидкости, чем твердые тела.

Аморфные полимеры используют для получения самых различных веществ: от резины и искусственной кожи до так называемого органического стекла, применяемого в самолетах. Иначе говоря, они могут обладать свойствами стекла, резины или кожи. Однако это их различие существует только при обычных (комнатных) температурах. Каждый из аморфных полимеров может изменить одно из своих свойств на другое в зависимости от температуры. Резина, если ее заморозить до температуры ниже — 80°, разлетается при ударе, как

стекло. Если стекловидную пластмассу нагреть, она, наоборот, становится сначала мягкой и гибкой, как кожа, а затем приобретает свойства резины. Если продолжить нагревание, она становится жидкотягучей.

Все эти превращения обычно протекают в интервале температур, не превышающем 40°. Каждый полимер имеет свою переходную температуру, при которой он теряет свойства стекла и приобретает свойства кожи. Она зависит от строения молекулы и от энергии, удерживающей вместе совокупность больших молекул. Например, резина из хрупкого (замороженного) вещества превращается в эластичное уже при сравнительно низкой температуре, так как ее молекулы удерживаются друг возле друга довольно слабо.

Полимеры, состоящие из более «жестких» (т. е. более прочно связанных друг с другом) молекул, теряют свое стекловидное состояние лишь при сравнительно высокой температуре.

У аморфного полимера с повышением температуры молекулярные цепочки приходят в нарастающее броуновское движение. Сначала в колебательное движение приходят самые коротенькие участки — длиной в несколько атомов,— а затем и более длинные. Размах такого движения ограничивается только перемычками, которыми цепочки могут стягиваться между собой, да многочисленными узлами и переплетениями запутанного клубка молекул.

При относительно низкой температуре, когда в быстром колебательном движении находятся только крошечные участки цепочек, полимер становится похожим на кожу — эластичным, гибким. Чем выше температура, тем он становится менее прочным, более податливым. Он все больше приобретает свойства резины. Такое состояние соответствует особо энергичному хаотическому движению всех участков молекул во всех мыслимых направлениях. При этом полимер все еще сохраняет свою форму.

Наконец, наступает температура, при которой аморфный полимер теряет свою форму и начинает течь, как очень вязкая жидкость. Однако жидкий полимер — не обычная жидкость. Его текучесть определяется не способностью одной молекулы скользить вдоль другой, как у обычных жидкостей, а способностью скользить всей совокупности отдельных звеньев длинных молекулярных цепочек. Следовательно, вязкость полимера зависит главным образом от длины его молекул, т. е. от степени полимеризации.

Полимер в таком состоянии значительно легче превращать в готовое изделие — путем прессования или выдавливания через тончайшие отверстия. Получаются длинные нити, из которых делают затем искусственное волокно. Так ведут себя высокомолекулярные вещества с линейными или разветвленными молекулами — термопластические смолы (рис. 9 — цв. табл. на стр. 662).

Иначе ведут себя термореактивные, отвердевающие при нагреве смолы, с молекулами которых при нагревании происходят химические изменения (рис. 9*а* — цв. табл. на стр. 662). Жидкотекучесть их устраняется образованием между соседними молекулами многочисленных связок. Именно эту роль выполняют атомы серы в вулканизированной (нагретой вместе с серой) резине (рис. 2 — цв. табл. на стр. 660).

Выбить атомы водорода из звеньев длинных молекул каучука и других полимеров и дать возможность этим цепочкам соединиться между собой посредством прямой связи атомов углерода одной молекулы с атомами углерода других молекул можно при помощи ионизирующего излучения. С успехом можно использовать обладающие большой энергией гамма-лучи, поток быстрых электронов, протонов или положительных ионов, а в ряде случаев ультрафиолетовые лучи. При этом полимер тоже теряет свойство текучести.

Более частое расположение таких связок позволяет полимеру сохранять стекловидное состояние вплоть до температуры, при которой начинается его разложение или горение.

К этой группе полимеров относится хорошо известный бакелит.

Ко второй группе полимеров относятся такие вещества, структура которых частично имеет свойства кристаллических тел. Эти свойства приходятся на те участки полимера, где все короткие отрезки большого числа длинных молекул улеглись параллельно друг другу. Эти островки порядка в море беспорядка — крошечные кристаллики не более одной миллионной доли сантиметра длиной. Однако их можно обнаружить при помощи рентгеновских лучей или даже увидеть невооруженным глазом, если рассматривать полимер в лучах поляризованного света. Другие звенья длинной молекулы, расположенные между кристалликами, тесно переплетены с такими же звеньями других молекул. Они образуют аморфные участки полимера, которые служат своеобразным клеем, скрепляющим все эти мелкие кристаллики в некоторое подобие кристаллического тела.

Поведение частично кристаллических полимеров значительно сложнее полностью аморфных полимеров и изучено еще очень мало. Они могут быть и в стекловидном состоянии, которое утрачивают при некоторой определенной температуре. Это изменение означает, что в аморфных частях структуры связанные друг с другом звенья больших молекул освободились друг от друга. Тем не менее, в отличие от полностью аморфных, частично кристаллические полимеры не приобретают свойств резины или кожи. Они утрачивают хрупкость, но не твердость. Закристаллизованные участки устраняют тенденцию полимера к деформации.

Твердость этих полимеров зависит непосредственно от количества кристаллических участков. Однако и наличие аморфных участков оказывается весьма полезным. Аморфные участки придают изделиям из полимеров достаточную упругость, что особенно полезно в тех случаях, когда эти изделия подвергаются ударным нагрузкам.

Кристаллическая структура чаще всего встречается у полимеров, цепные молекулы которых имеют относительно простую и симметричную структуру.

Молекулы полимеров, встречающихся в природе (шерсти, шелка, хлопка), всегда определенным образом ориентированы и поэтому обладают высокой прочностью. Подобная ориентация, если ее удается осуществить в искусственных волокнах, придает последним прочность стали.

Ориентация молекул полимеров одновременно в двух направлениях позволяет получить очень прочные пленки. В частности, высокая прочность резины, которая при обычных температурах имеет аморфную структуру, получается за счет того, что в растянутом состоянии она приобретает свойства кристаллической структуры.

Разобранные выше закономерности в поведении высокомолекулярных полимеров составляют лишь небольшую часть того, что необходимо о них знать для полного овладения этой удивительно сложной областью современной органической химии. Ученым предстоит решить еще очень много проблем.

Тем не менее достигнутые результаты уже открыли чрезвычайно важные перспективы для создания новых материалов и изделий из них. Для этой цели в распоряжении химиков есть не менее 40 видов органических мономеров, добываемых главным образом из угля, нефти и естественных газов — сырья, имеющегося в нашем распоряжении в огромных количествах.

Может показаться, что это не столь уж много — 40 видов. Но из этих «кирпичиков» химия полимеров может получать бесконечное количество комбинированных веществ — синтетических волокон, смол и пластических масс. И каждый день приносит нам все новые и новые открытия в этой области, новые материалы. Упомянем только некоторые из них.

Известно, что резина, изготовленная из натурального каучука, страдает целым рядом недостатков. Она разбухает в бензине, боится масла, разрушается при нагревании выше 120°. А теперь уже есть не один, а довольно много сортов искусственных каучуков, устойчивых против действия бензина, масла, глубокого холода и температур выше 300°. Полиуретановый каучук, химически совершенно непохожий на естественный, настолько прочен, что изготовленные из него шины могут пережить сам автомобиль.

Когда-то людей удивляла необыкновенная прочность шелкового волокна. Прочность капрона вдвое превышает прочность шелка и в шесть раз больше, чем у шерсти. На разрыв она равна прочности некоторых сортов стали.

Известны сорта полимерных пленок, которые выдерживают до 5 млн. двойных перегибов. Современная химия дает нам полиамидные искусственные волокна, которые на истирание в 20 раз прочнее шерсти и в 10 раз — хлопка.

Наряду с чисто химическими способами получения полимеров в арсенале ученых есть методы и средства для того, чтобы вести полимеризацию, применяя высокие и сверхвысокие, низкие и сверхнизкие температуры и давления, новые катализаторы, источники всевозможных облучений и т. д.

Но это еще не все. Зная законы образования полимеров, можно изменять свойства высокомолекулярных полимеров. Допустим, в полимер (рис. 11, справа — цв. табл. на стр. 663), не обладающий высокой температурной стойкостью, ввели мономер, который изменил однообразную структуру полимера. В результате получился так называемый высокомолекулярный сополимер, имеющий уже высокую теплостойкость (рис. 11, слева). Путем такого «сшивания» определенного количества мономеров одного сорта с тем или иным числом мономеров другого сорта можно получать различные сополимеры. Последние часто обладают очень высокой сопротивляемостью против дей-

ствия различных растворителей, высокой прочностью и другими ценными свойствами.

В области создания высокополимеров нашли применение и методы прививки, обычно встречающиеся только в садоводстве (рис. 12 — цв. табл. на стр. 663). При этом полимеризация мономера, входящего в качестве звена в цепочку основного полимера, производится путем присоединения мономера, являющегося крайним звеном другой большой молекулы. Из такой молекулы-мономера тем или иным способом вырывают атомы, обычно атомы водорода. Тогда на освободившихся местах молекулы-гиганта вырастает боковая цепь мономера, полимеризующегося в веточку. Прямолинейная гигантская молекула начинает ветвиться, как дерево. Но ветви эти имеют особый состав, и весь полученный таким путем полимер приобретает совершенно новые свойства.

Так можно и «привить» полистирол к целлюлозе. Последняя жадно впитывает воду, а полистирол отталкивает ее. В результате материалы, изготовленные из такой целлюлозы, приобретают способность отталкивать воду. Это весьма важно для тканей, идущих на изготовление складных лодок, палаток, плащей и т. д.

Сколько огорчений и неприятностей вызывает вид помятой одежды, плохо выглаженного белья, сколько полезного времени отнимает утюжка. И вот, теперь, «прививая» молекулы акрилнитрила к молекулам целлюлозы, можно получить немнущиеся ткани, которые не требуют глажения после стирки.

И В ОГНЕ НЕ ГОРИТ...

Действие некоторых научно-фантастических повестей развертывается на очень горячих планетах, где температура атмосферы достигает нескольких сот градусов, текут реки из расплавленного камня, а населяющие их живые существа без всякого для себя вреда выдерживают подобную жару.

Есть ли доля истины в таких неправдоподобных рассказах?

Так могло бы, пожалуй, быть, если бы в состав «живой материи» вошли атомы кремния. Ведь все, что в природе связано с этим элементом, отличается высокой температурной стойкостью.

Конечно, создать живую материю на базе кремния еще никому не удавалось, и до этого, видимо, еще очень и очень далеко. Но внедрить в органические полимеры атомы кремния удалось еще лет 20 тому назад. Тогда впервые были получены полимеры-гибриды водородных соединений углерода и кислородных соединений кремния, т. е. органических и неорганических полимеров.

Развитие авиационной, автомобильной, оборонной и других отраслей промышленности создало потребность в электрических двигателях, которые давали бы максимальную мощность при очень небольших размерах. Этого можно достигнуть только при резкой перегрузке двигателей, что неизбежно ведет к соответствующему увеличению их рабочих температур. Чтобы двигатели выдержали столь высокую температуру, требовалось получить совершенно новые изоляционные материалы, способные выстоять при удвоенном и даже утроенном перегреве. Получить их сразу тогда не удалось.

Вместо них в руках химиков оказались только содержащие кремний жидкости. Впрочем, нашлось применение и для них: их стали употреблять в качестве смазочных масел, выдерживающих высокую температуру.

Примерно к 1945 г. были получены уже первые содержащие кремний каучуки, а затем и резина.

В отличие от молекул органических веществ, в которых атомы углерода соединяются между собой прямыми валентными связями, в кремний органических полимерах атомы кремния внутри мономера соединены между собой через атомы кислорода (рис. 13 — цв. табл. на стр. 663). Вследствие этого такие соединения и называют силоксанами (от латинских слов силициум — кремний и оксигениум — кислород).

Силоксаны так же, как и органические мономеры, способны соединяться в длинные цепочки боковыми ответвлениями. Вязкость жидких полимеров увеличивается по мере увеличения длины молекул. При этом они преобразуются в вязкие смолы, затем в каучуки и, наконец, в твердые вещества. В тех случаях, когда цепочки кремнийорганических полимеров связаны между собой перемычками, они образуют объемную структуру, приближающуюся к структуре кварца.

Получать кремнийорганические вещества можно несколькими путями, в том числе и теми, какими получаются органические полимеры, т. е. поликонденсацией и полимеризацией.

И хотя эта отрасль химии высокомолекулярных соединений зародилась относительно

недавно, ее вклад в науку и технику уже очень велик и продолжает расти с каждым днем.

Возьмем кремнийорганические смолы. Это превосходная основа для производства всевозможных покрытий, в том числе для водоотталкивающих. На их основе удалось создать покрытия, например, предохраняющие бетон и камень от разрушения. Силоксановые, или силиконовые, краски и лаки позволяют окрашивать нагреваемые предметы (печи, трубопроводы и т. п.), которые раньше вообще не окрашивались, так как любые краски на них разлагались или выгорали.

Силиконовыми смолами пропитывают ткани из стеклянного волокна, используемые для обмоток электрических машин, это позволяет более чем удвоить рабочие температуры машин, а следовательно, и развиваемую или пропускаемую ими электрическую мощность.

Особенно удивительные качества приобретают резины, получаемые на основе кремнийорганических полимеров с весьма высоким молекулярным весом. Никакая резина, например для автомобильных покрышек, изготовленная из естественного или искусственного каучука, не может выдержать в рабочих условиях изменения температур от —80° до +200°. А некоторые сорта силиконовой резины выдерживают нагрев до 300°.

Будучи исключительно теплостойким, кремнийорганический каучук плохо переносит действие бензина и масла. Но если пленки из него ввести в соответствующий органический мономер (например, акрилонитрил) и воздействовать на них сильным гамма-излучением, то к кремнийорганическому полимеру можно с успехом «привить» боковые веточки полиакрилонитрила, весьма устойчивого против действия бензина и масел. Так получается теплостойкая резина, устойчивая также против действия бензина и масел.

Интересны области применения кремнийорганических эмульсий. Многие приборы (вентили, части насосов и т. д.), через которые проходят горячие и едкие жидкости, нуждаются в смазке. Никакие масла́, жиры, тавоты для этого не пригодны. А водоотталкивающая, теплостойкая, прочно удерживающаяся на рабочей поверхности кремнийорганическая эмульсия прекрасно справляется с поставленной задачей. Электрический двигатель с кремнийорганической изоляцией обмотки работает без потери энергии даже под водой, так как эта изоляция обладает превосходными электроизолирующими свойствами.

Кремнийорганические смазки, если их нанести тонким слоем на стекла самолета или автомобиля, длительное время предохраняют их от заливания водой, запотевания, обледенения. При выливании жидкости из посуды, покрытой тонким слоем кремнийорганической смазки, на стенках не остается ни капли жидкости. Это очень важно для некоторых химических производств и лабораторных экспериментов.

Очень ценны кремнийорганические вещества в тех случаях, когда нужно предотвратить прилипание одного вещества к другому, причем действие смазки в данном случае не зависит от того, будут эти вещества в холодном, теплом или горячем виде. Модель не пристанет к формовочной смеси в литейном производстве, резина — к формам, жидкости — к трубам, вода — к тканям и т. п.

Ребенок, выдувающий мыльные пузыри считает пену одним из достоинств мыла. Однако существует целый ряд производств где появление пены — серьезный недостаток и даже может представлять опасность. Пена — это скопление в жидкости газовых пузырьков, образованию которых способствуют незначительные примеси некоторых белков, моющих веществ и других так называемых поверхностно-активных веществ. Эти примеси концентрируются в виде тончайших пленок на границе между воздухом и жидкостью. Если жидкость кипит или перемешивается, количество пены резко увеличивается.

Существует много способов уничтожения пены: механические (вращающиеся диски, центрифуги), химические (добавление алкоголя, касторового масла). Однако все они до́роги, недостаточно эффективны, а главное, больше препятствуют образованию новой пены, чем ликвидации старой.

И лишь кремнийорганические вещества радикально устраняют эти неприятности, причем требуемое для этого количество примеси весьма невелико: от одной до 25 частей на миллион!

Таковы лишь немногие, но очень интересные и важные области применения кремнийорганических соединений. Но и их более чем достаточно, чтобы представить себе увлекательные перспективы, открывающиеся здесь перед наукой и техникой ближайшего будущего. И если когда-нибудь человеку удастся, раскрыв до конца тайну строения молекул живого веще-

ства, создать затем их в лабораторной пробирке, то вслед за этим, может быть, удастся создать и такую молекулу, которая, подобно жар-птице, будет жить в испепеляющем пламени.

БУДУЩЕЕ ПОЛИМЕРОВ

Сейчас химия высокомолекулярных соединений достигла такой стадии, когда она способна создавать материалы с определенными, заданными свойствами, «выкроенные» и «сшитые» по заказу.

Но достижения химии полимеров сегодняшнего дня — это лишь первые шаги. Самый крупный полимер, используемый сейчас в производстве пластических масс, имеет молекулярный вес около 2 000 000. Есть все основания предполагать, что, пока печатаются эти строки, в лабораториях будут получены полимеры с еще бо́льшими молекулярными весами.

Создаваемые ныне вещества обладают высокой, достигающей 300° теплостойкостью. Но сегодня этого уже явно мало. На очереди задача создания еще более теплостойких веществ, возможно, на основе некоторых очень устойчивых органических мономеров.

И, наконец, венец органической химии — живое вещество, белок. Ведь и сейчас уже известны полимеры, которые могут выполнять некоторые функции крови животных. Человеку рано или поздно удастся приблизиться к тому удивительному совершенству, с каким живой организм строит свои гигантские молекулы. Но об этом пойдет речь в другой статье.

ИЗ ЧЕГО ДЕЛАЮТ ОДЕЖДУ

Кто же не знает, что одежду шьют из тканей! Тканей мы знаем великое множество. Одни из них тонки, как паутина, другие похожи на рогожку. Одни черны, как уголь, другие — цвета небесной лазури, третьи — расцвечены причудливым узором и ласкают глаз тонкостью оттенков.

Однако нас будет интересовать не раскраска тканей. Важно, из чего их делают. Ведь от этого зависит, будет ли костюм прочным и как надо обращаться с одеждой, чтобы она дольше носилась. Ткани для одежды делают из волокон: природных (растительных и животных), искусственных и синтетических.

Коробочка хлопчатника.

Волокна растительного происхождения можно видеть, например, у льна. Стебель его, после того как полежит на сырой земле, при «трепании» легко распадается на длинные волоконца. Из них прядут льняные нити, а затем, переплетая их на ткацких станках, готовят ткани. Льняные ткани славятся прочностью. Из них делают рубашки, полотенца, скатерти, брезенты и т. п.

На юге нашей Родины возделывают хлопчатник. Когда заканчивается цветение этого кустарника и созревший плод (коробочка) раскрывается, необозримые поля словно покрываются пушистым белым покрывалом. Семена хлопчатника покрыты множеством белых волоконец (хлопком). Отделенные от семян волоконца представляют собой обычную вату. Однако основная масса хлопка идет не в аптеки, а на текстильные фабрики. Там из него прядут нити и вырабатывают миллионы метров хлопчатобумажных тканей, из которых потом шьют белье, платья и многое другое.

Шерстяные ткани делают из животных волокон. Из шерсти овец, коз, верблюдов тоже можно прясть нити, как из волокон хлопчатника или льна. Из шерстяных нитей вяжут теплые носки, рукавицы, фуфайки, делают ткани для костюмов, пальто.

Но самое замечательное волокно, пожалуй, шелковое. Его вырабатывает маленькая гусеница тутового шелкопряда. Наблюдали ли вы когда-нибудь, как паук ткет свою паутину? Примерно так же действует и гусеница шелкопряда. Она выдавливает через узкое отверстие в своем тельце вязкую жидкость и вытягивает ее в тончайшую нить, затвердевающую на воз-

духе. Однако эту нить гусеница не развешивает по углам, как паук, а обматывает вокруг себя — строит кокон, под укрытием которого она превращается сначала в куколку, а затем в бабочку. Таких гусениц издавна разводят на специальных плантациях, коконы их собирают, разматывают и из нитей готовят шелковые ткани.

Как неопытному человеку узнать, хлопчатобумажная или шерстяная ткань у него в руках, т. е. из растительного она волокна или из животного? Очень просто! Отделите от ткани несколько нитей и подожгите их. Если ощущается запах жженных волос или паленой шерсти, значит, ткань животного происхождения; если же появляется запах горелой бумаги — ткань из растительных волокон.

Разный запах при горении получается оттого, что растительные и животные волокна имеют разный химический состав. Растительные волокна состоят из клетчатки, а животные — из белков.

Клетчатка, или ц е л л ю л о з а, образует оболочки всех растительных клеток (слово «целлула» значит «клеточка»). Это как бы скелет растения. В сухом сосновом или березовом полене клетчатка составляет около половины его веса, в льне ее еще больше, а хлопок — это почти чистая клетчатка. Из чего же состоит клетчатка?

Паук плетет нить, которую можно было бы намотать на катушку.

Три хорошо всем известных вида атомов входят в состав ее молекулы — углерод, водород и кислород. Когда ученые узнали, в каком соотношении входят эти атомы в молекулу клетчатки, они составили ее формулу — $C_6H_{10}O_5$. Однако это только простейшая формула клетчатки. Истинную ее молекулярную формулу изображают так: $(C_6H_{10}O_5)_n$. Буква n показывает, что в молекуле очень много групп атомов $C_6H_{10}O_5$ — до нескольких тысяч. Эти группы соединены друг с другом в длинные цепочки. Такие нитеобразные молекулы, располагаясь рядом друг с другом, как спички в коробке или прутья в венике, и образуют волокна.

Тутовый шелкопряд.

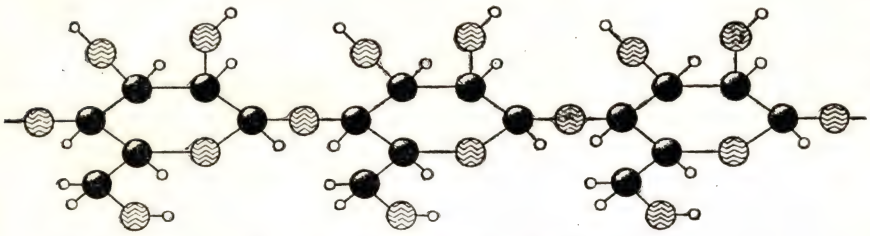
Белки — непременная составная часть всех растительных и животных клеток. Довольно чистые белки представляет собой всем известный творог (этот белок называют казеином) и белок куриного яйца (этот белок называют альбумином). Из белка состоят наши волосы, ногти, а у животных — шерсть, копыта, рога и т. п.

Химический состав белков сложнее, чем состав клетчатки. Кроме атомов углерода, водорода и кислорода, в них обязательно входят атомы азота и часто атомы других элементов. Молекулярный вес белков в отдельных случаях достигает нескольких миллионов. Понятно, что строение их особенно сложно.

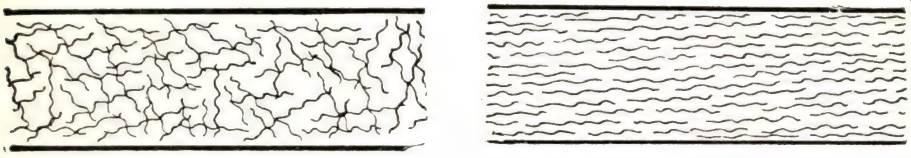
Белки легче подвергаются химическим изменениям, чем клетчатка. Стоит по неосторожности капнуть на шерстяную одежду раствором щелочи, как ткань в этом месте быстро расползется. Поэтому опытная хозяйка при стирке белья не станет кипятить шерстяные изделия со щелоком или содой.

Вот мы как будто и узнали, что собой представляют волокна, из которых делают одежду. Но узнали еще не все. Ведь ткань для одежды делают не только из растительных и животных волокон.

Химия не только помогает человеку использовать в своих нуждах то, что дает природа.



Строение молекулы клетчатки.



Беспорядочное и параллельное расположение молекул.

Она создает для нас много нового, такого, чего нет в природе.

Гусеница тутового шелкопряда за всю свою жизнь дает лишь около грамма шелковой нити. А для разведения ее нужны тутовые деревья, особые климатические условия и тщательный уход.

Хлопок растет медленно, требует много солнца, тепла и влаги, из-за плохой погоды легко может быть плохой урожай. Получение шерсти связано с животноводством; скот нужно обеспечивать кормами, не допускать заболеваний и соблюдать массу других условий.

Нельзя ли создать шелк искусственным способом?

Более 200 лет назад Реомюр (вспомните термометр Реомюра), размышляя о том, как шелковичный червь или паук изготовляет нити, предположил, что можно искусственно получить нити, вытягивая какие-нибудь густые, вязкие, как мед, жидкости. Сколько было приготовлено разных составов, сколько раз в эти жидкости опускались палочки, чтобы с помощью их вытянуть нить! Но нити не получались. Гусеница оставалась незаменимой. Однако именно она снова натолкнула ученых на верный путь.

Гусеница питается листьями тутового дерева, клетчатку листьев она превращает в азотсодержащую белковую жидкость, которая на воздухе затвердевает в нить. Значит, решили ученые, чтобы получить нужный состав, следует клетчатку обработать каким-то химически активным азотсодержащим веществом.

Для этого взяли азотную кислоту. Ведь всем известно, что она сильно действует на многие вещества. Затем обработали ею хлопок (клетчатку) и растворили продукт в смеси спирта и эфира. Получилась сиропообразная жидкость. Из нее палочками удалось вытягивать затвердевающие на воздухе тонкие нити. Так был получен искусственный шелк. Оставалось лишь до конца подражать шелкопряду.

Вязкий раствор клетчатки, обработанной азотной кислотой,—нитроклетчатку—стали продавливать через тонкие отверстия, и в результате... на Всемирной выставке в 1889 г. посетители смогли любоваться первыми образцами искусственного шелка, которые не уступали по блеску и красоте натуральному.

Пленочку нитроклетчатки вы можете наблюдать, если на гладкую поверхность нальете немного медицинского коллодия. Когда летучий растворитель испарится, останется твердая пленка коллоксилина. Это тоже нитрованная клетчатка. Положите ее на руку и подожгите. Пленочка моментально сгорит, не успев обжечь руки. Горючесть — крупнейший недостаток нитрошелка.

Выделение нитей клетчатки из раствора.

Начались поиски других способов получения искусственного шелка. Так появились медно-аммиачный, вискозный и ацетатный шелка.

С медно-аммиачным способом получения шелка вы можете познакомиться практически в школьной лаборатории или даже дома. Прилейте к раствору медного купороса раствор едкого натра. Получится голубой осадок гидрата окиси меди ($CuSO_4+2NaOH=Cu(OH)_2+Na_2SO_4$). Отфильтруйте его и растворите в крепком нашатырном спирте (вод-

ном растворе аммиака). Образуется красивая темно-синяя жидкость.

Теперь растворяйте в ней, помешивая палочкой, вату — сколько может раствориться. Получится медно-аммиачный раствор клетчатки. Если теперь его вылить тонкой струей в раствор серной кислоты, то клетчатка снова выделится в виде хлопьев и нитей. Для большего подражания производственному процессу можно медно-аммиачный раствор выдавливать в осадительную ванну из какого-нибудь насосика, например из шприца. Тогда клетчатка затвердевает в виде длинных нитей.

Медно-аммиачный шелк называют «паутиной с прочностью стали». Но он тоньше паутины и тоньше натурального шелка. По прочности он почти не уступает натуральному шелку, а по красоте даже превосходит его.

Но вас уже давно занимает мысль: «Когда же пойдет речь об известном вам вискозном шелке?» Да, вискозный шелк самый распространенный! Он и самый дешевый, так как изготовляется из широко доступного сырья. Это про него говорят: «Шелк из древесины». Вполне естественно обратиться к древесине как сырью для получения шелка. Ведь она содержит ту же клетчатку, которая образует и хлопок.

Для выделения целлюлозы древесину варят с раствором бисульфита кальция в больших закрытых котлах под давлением в несколько атмосфер. Бисульфит разрушает вещества, склеивающие волокна клетчатки. В результате получается довольно чистая клетчатка, так называемая сульфитная целлюлоза. Часть ее идет на выделку бумаги (бумага — тоже клетчатка), а часть — на производство вискозного шелка.

Сульфитную целлюлозу обрабатывают раствором щелочи и сероуглеродом CS_2. После этого она растворяется в разбавленных щелочах. Вязкий щелочной раствор клетчатки и называется вискозой. Ее продавливают через тонкие отверстия в слабый раствор кислоты, где клетчатка затвердевает в волоконца.

Прядение искусственного шелка.

Примером синтетических волокон служат пользующиеся сейчас большой известностью нейлон, капрон, хлорин, лавсан, силон и др. Исходное сырье для их получения: уголь, вода, воздух, известняк. В результате сложной химической переработки этого широко доступного сырья создают вещества, которые обладают интересным свойством. Если их подвергать нагреванию в определенных условиях, то молекулы их соединяются друг с другом в длинные цепи (см. ст. «Полимеры»).

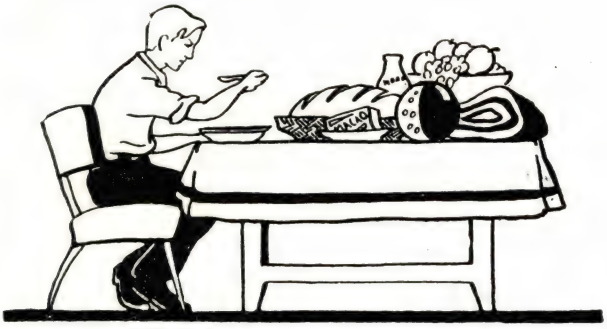
Синтетическая нить так легка, что клубком в 2 кГ можно обвить весь земной шар.

Мы уже можем насчитать десятки различных видов искусственных и синтетических волокон, а химики все продолжают удивлять нас новыми «рецептами» тканей.

ИЗ ЧЕГО СОСТОИТ НАША ПИЩА

Замечательная это лаборатория — кухня! Сколько чудесных химических превращений совершается в ней!

Вы хотели налить себе стакан молока, но, оставленное в теплом месте, оно скисло, и вы съедаете уже простоквашу. Вы с наслаждением вдыхаете аромат свежеиспеченного хлеба, покрытого аппетитной корочкой. Но ведь хлеб — это уже совсем не то, что мука, из которой он был испечен. Вы хотели поджарить яичницу, но зазевались, и яичница на сковородке «подгорела». А вот варится суп. Мясо в нем поте-



ряло прежнюю окраску, оно стало серым и легко распадается на отдельные волоконца.

Пока человек не умел добывать огонь, он пользовался растительной и животной пищей в том виде, в каком находил ее в природе,— питался сырым мясом и сырыми плодами. А теперь едва ли кто-нибудь возьмется перечислить все те кушанья, какие умеют готовить люди.

Из каких же веществ состоит все это богатство современной кулинарии? Что происходит с пищей при ее приготовлении, а затем и в нашем организме?

Человеку для питания нужны прежде всего три вида веществ — углеводы, жиры и белки. Продукты питания и состоят из этих веществ. Сало и масло — это жиры; в картофеле, овощах и хлебе много углеводов; мясо, рыба, яйца богаты белками.

Всякий знает, что кроме этих веществ человеку нужны еще вода и соли. И то и другое также содержится в нашей пище. Например, в каждых 100 *Г* капусты—90 *Г* воды. Но, кроме того, воду человек употребляет и отдельно, а соль добавляет в пищу. Известно также, что наш организм нуждается еще в микроскопических количествах так называемых витаминов.

Мы будем говорить здесь о главных составных частях нашей пищи—об углеводах, жирах и белках.

Начнем с... киселя! Чтобы его сварить, нужен крахмал. Все знают это белое мучнистое вещество (его называют иногда картофельной мукой). Крахмал разбалтывают в воде и выливают, помешивая, в кипящий фруктовый сироп, который сразу начинает густеть. Вот этот крахмал и есть главный представитель углеводов, необходимых нашему организму.

«Как же это может быть, — спросите вы недоуменно, — ведь кисель мы едим сравнительно редко, а углеводы нужны организму постоянно?»

Дело в том, что крахмал мы употребляем обычно не в чистом виде, а в составе различных продуктов. Его много во всякой растительной пище — в клубнях и корнях, плодах и зернах. Каждые 100 *Г* картофеля доставляют организму около 20*Г* крахмала, 100 *Г* пшеничной муки — около 70 *Г* крахмала и т. д.

Чтобы убедиться в том, что крахмал в этих продуктах есть, проделаем опыт. Изотрите на терке две-три хорошо промытые картофелины. Затем заверните картофель в реденькую тряпочку и разминайте пальцами в воде до тех пор, пока не перестанет образовываться муть. После этого остаток в тряпочке выбросьте, а воде дайте отстояться. Вы заметите на дне кастрюли белый осадок. Слейте с него воду. Это и есть крахмал.

Чтобы быстро определить присутствие крахмала, есть один весьма простой способ. Купите в аптеке йодную настойку, разбавьте ее водой и капните этим раствором в сваренный вами крахмальный клейстер. Жидкость сразу же окрасится в ярко-синий цвет. Разбавьте клейстер в 10—20 раз водой. Он и после этого от йода посинеет. Давайте теперь искать крахмал с помощью йодной настойки в различных продуктах.

Капните раствором на свежий срез картофеля, на кусочек вареного картофеля, на срез неспелого яблока, на ломтик белого хлеба, капните даже на пудру. Всюду, оказывается, есть крахмал. Но синевы не получится, если капнуть йодным раствором на ломтик сала, кусочек мяса, на поваренную соль или на щепочку.

Крахмал — сложное вещество, он состоит из трех видов атомов: углерода, водорода и кислорода. Вы уже вспомнили, что из этих же трех видов атомов состоит и клетчатка. Сходство по составу крахмала и клетчатки прямо-таки разительное! У них даже одна и та же формула $C_6H_{10}O_5$, и в молекуле крахмала, как и в молекуле клетчатки, таких групп — $C_6H_{10}O_5$—тысячи. Почему же крахмал и клетчатка разные вещества? Причина в том, что звенья $C_6H_{10}O_5$ в молекуле клетчатки соединены в одну длинную цепь, а в молекуле крах-

мала разветвлены. Поэтому крахмал не образует волокон, а клетчатку люди не употребляют в пищу — она не переваривается в желудке.

В природе крахмал находится в виде зерен в растительных клетках. Зерна эти можно видеть под микроскопом. Каждое из них — это скопление громадного числа молекул. Когда вы терли картофель, то разрывали оболочки клеток, зерна освобождались, отмывались и осаждались на дно.

Заметили ли вы, что на срезе клубня картофеля окраска от йода появляется не сразу? Это потому, что зерна крахмала там защищены оболочкой. А в вареном картофеле клетки набухают от воды, оболочки лопаются, и йод беспрепятственно попадает к крахмалу.

В поисках крахмала капнем, кстати, йодом себе на руку. Да зачем капать? Мы и так знаем, что от йода наша кожа не синеет. Сколько крахмала мы поедаем в виде хлеба, картофеля, овощей, но в составе наших тканей его нет. Что же происходит с молекулой крахмала, когда она с пищей попадает в наш организм?

Как аппетитно выглядит жареный картофель! При одном его виде, особенно если вы проголодались, выделяется слюна, как говорится «текут слюнки». И они текут недаром: для них сейчас найдется дело.

При пережевывании во рту пища обильно смачивается слюной. В ней есть особое вещество — фермент амилаза. Большие молекулы крахмала могут разлагаться молекулами воды на более мелкие части, и амилаза помогает в этом воде (см. стр. 639).

Разложение молекулы крахмала на все более и более мелкие части продолжается и дальше — в желудке и кишечнике (под влиянием других ферментов), — пока он в конце концов не превратится в глюкозу — $C_6H_{12}O_6$. Ее много в винограде, она и придает ему сладкий вкус. Поэтому глюкозу часто называют виноградным сахаром.

Наш организм крахмал непосредственно не усваивает, так как его крупные молекулы не могут всасываться в кровь через стенки кишечника. Маленькие, растворимые в воде молекулы глюкозы, наоборот, легко проникают в кровеносные сосуды и доставляются током крови ко всем тканям организма. Там глюкоза окисляется поступающим с кровью кислородом и превращается в углекислый газ и воду. При этом выделяется тепло. Оно дает организму жизненную энергию и поддерживает определенную температуру тела. Значит, крахмал — это как бы топливо нашего организма.

Теперь понятно, почему слабому больному для укрепления сил врачи прописывают глюкозу.

Замечательное явление! Если крахмал полностью превращается в глюкозу, то глюкозы получается больше, чем было крахмала. Каждое звено $C_6H_{10}O_5$ превращается в молекулу глюкозы $C_6H_{12}O_6$. Сравните эти формулы. Между ними разница на молекулу воды — H_2O. Превращение крахмала в глюкозу к тому и сводится, что к каждому звену $C_6H_{10}O_5$ присоединяется молекула H_2O. Эту реакцию изображают так:

$$\underset{\text{крахмал}}{(C_6H_{10}O_5)_n} + \underset{\text{вода}}{n\,H_2O} = \underset{\text{глюкоза}}{n\,C_6H_{12}O_6}.$$

Разложение вещества водой называется гидролизом. При гидролизе крахмала, прежде чем появится глюкоза, образуется много промежуточных веществ, молекулы которых мельче молекул крахмала, но еще крупнее молекул глюкозы. Из этих веществ особенно важны декстрины.

Почему не едят сырую картошку, а предварительно варят или жарят ее? Почему не питаются непосредственно мукой, а пекут из нее хлеб? Да потому, что при варке, жарении и печении крахмал уже начинает подвергаться гидролизу — из него образуются декстрины. А в нашем организме они быстрее и легче превращаются в глюкозу, чем сам крахмал.

Декстрины клейки. Из них образуется твердая корочка на жареном картофеле или печеном хлебе. Их появлением объясняется и клейкость крахмального клейстера. Накрахмаленный воротничок под горячим утюгом становится твердым также потому, что крахмал превращается в декстрин.

Вернемся снова к нашей «химической лаборатории» — домашней кухне. Уже рассказывалось (стр. 639), как пекут хлеб или пироги. Муку смешивают с водой, добавляют дрожжи и сильно месят. После этого тесто ставят в теплое место и дают ему «подойти». Понаблюдайте-ка за ним в это время. Тесто понемногу поднимается, на нем лопаются какие-то пузырьки. Поднесите к тесту горящую лучинку. Она гаснет, как в углекислом газе. Да это и есть углекислый газ. В тесте под влиянием фермента дрожжей идет брожение. В нем накапливается углекислый газ, который поднимает тесто и даже выходит наружу. От этого хлеб при печении становится пористым. Такой хлеб лучше переваривается в организме.

Но ведь при брожении образуется спирт. Вы сможете обнаружить и его. Понюхайте поднявшееся и уже перестоявшееся тесто: оно пахнет спиртом.

К углеводам, которые идут нам в пищу, кроме крахмала и глюкозы, относится еще сахароза, или свекловичный сахар. Этот сахар мы употребляем в пищу.

Сахар сначала был найден в соке сахарного тростника, и Европа долго не знала его, так как тростник произрастал только в тропических странах. Но вот в XVIII в. сахар был найден в свекле. Казалось бы, чего проще: потереть свеклу, выжать сок, выпарить его — и сахар готов. Но он еще долго не давался в руки химикам. Сколько было неудач, прежде чем начали работать заводы по извлечению сахара из сахарной свеклы! Сейчас эти заводы вырабатывают во всех странах миллионы тонн сахара ежегодно.

Сахар не только лакомство, он очень питателен! Молекула его несложна — $C_{12}H_{22}O_{11}$. В организме человека она разлагается на молекулу глюкозы и молекулу фруктозы:

$$\underset{\text{сахароза}}{C_{12}H_{22}O_{11}} + H_2O = \underset{\text{глюкоза}}{C_6H_{12}O_6} + \underset{\text{фруктоза}}{C_6H_{12}O_6}.$$

Глюкоза и фруктоза имеют одинаковые формулы, но отличаются друг от друга строением молекул. Дальнейшая судьба глюкозы в организме нам известна. Такой же путь и у фруктозы.

Сахарный тростник и сахарная свекла.

Если вас спросить, что слаще — мед или сахар, вы вероятно, назовете мед. А знаете, почему он слаще сахара? Мед — это смесь глюкозы и фруктозы, а фруктоза слаще сахара.

Углеводы на наш стол поставляет природа. Зеленый лист растения — вот та замечательная фабрика, которая изготовляет их. На него падает световой луч. Он не пропадает бесследно. За счет световой энергии между водой, поступающей в лист из земли, и углекислым газом, поглощаемым из воздуха, происходит химическая реакция: $6CO_2+5H_2O=C_6H_{10}O_5+6O_2$. Образуются крахмал и кислород. Вот куда идет углекислый газ, которым «дышит» растение, и вот откуда берется кислород, «выдыхаемый» растением в атмосферу.

Углекислого газа и воды много вокруг нас. Не попытаться ли искусственно приготовить углеводы для нашей пищи? Образование углеводов в листе идет под действием особого катализатора — зеленого хлорофилла, который как бы ловит световой луч и его энергию обращает в химическую. Однако в лаборатории этот синтез так просто не идет. Все же нашему знаменитому химику А. М. Бутлерову удалось (правда, другим путем) искусственно получить сахаристый углевод. Крахмал вне зеленого листа пока не получили, но нет сомнения, что и такую задачу ученые смогут решить. И тогда реакция углекислого газа с водой в лаборатории, а затем и на заводе будет давать углеводы к нашему столу.

Теперь о жирах. Их известно много. Одни из них твердые; это преимущественно жиры животные — баранье и свиное сало, коровье масло. Другие — жидкие; это в основном растительные масла. Они содержатся в семенах конопли, льна, подсолнечника и т. д.

Молекулы жиров, как и молекулы углеводов, состоят из атомов углерода, водорода и кислорода. При гидролизе они распадаются на молекулы глицерина и «жирных кислот». Стеарин, из которого когда-то делали свечи,— это и есть смесь «жирных кислот». Переваривание жиров начинается лишь при выходе пищи из желудка в тонкие кишки, так как ни слюна, ни желудочный сок на них не действуют.

Под действием фермента тонких кишок — липазы — они разлагаются водой на глицерин и кислоты и всасываются через стенки кишечника в организм. При окислении жиров в тканях организма выделяется больше тепла, чем при окислении углеводов. Таким образом, жиры более калорийное «топливо» для нас.

Углеводы и жиры могут частично заменять друг друга в пище. На севере, где скудна растительность и низка температура, человек потребляет преимущественно жирную пищу, а на юге, богатом растительностью, где организму не приходится тратить столько тепла, человек больше питается овощами и фруктами.

Если вам предложить к столу сливочное или растительное масло, вы выберете первое. Всякому известно, что животные жиры вкуснее растительных. Твердые животные жиры в большом количестве используются также и в мыловарении. Откуда же взять столько жиров? Решить эту задачу нам помогла химия. Она научилась превращать жидкие растительные жиры в твердые.

Оказалось, что если в жидком растительном масле размешать мелкий порошок металла никеля, а затем пропускать водород, то водород присоединяется к маслу и образуется твердый жир. Никель служит катализатором в этой реакции гидрогенизации (гидрогениум — водород). Гидрогенизированный жир используется для получения маргарина.

Маргарин готовят, сильно перемешивая смесь животных и гидрогенизированных жиров с молоком. Для большей питательности к нему добавляют еще витамины. Он очень хорошо усваивается организмом и по питательности не уступает обычным жирам.

О белках мы уже знаем, что это очень сложные органические вещества, в состав молекул которых, кроме атомов углерода, водорода и кислорода, входят еще атомы азота и другие элементы. Так как белки — «носители жизни» и входят в состав всех живых клеток, то мы неизбежно употребляем их в пищу, питаемся ли мы растительной или животной пищей.

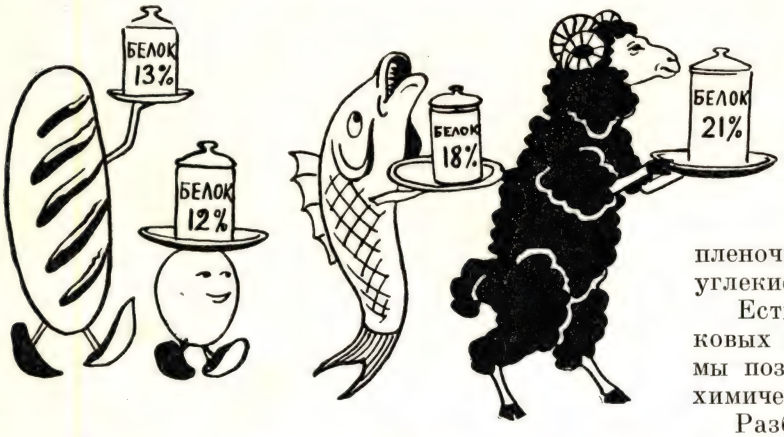
Однако главными «поставщиками» белков для нас служат мясо (в нем белка примерно 21%), рыба (18%), яйца (12%), хлеб (в сухом хлебе — 13%).

Белки — это прежде всего «строительный материал» тканей организма. Один ученый сказал, что клеточки организма — это печки, построенные из белка, в которых горят жиры и углеводы. Но и белки тоже подвергаются изменениям в нашем организме. Они как бы «изнашиваются», сгорают и требуют замены. Беспрерывное обновление клеток организма идет за счет белков пищи.

Белки, следовательно, невозможно заменить углеводами или жирами, как те заменяют друг друга. При отсутствии их в пище человек начинает худеть, так как расход их перестает восполняться. При длительном белковом голодании может наступить полное истощение и смерть.

Сложные молекулы белков под действием разных ферментов (пепсина и трипсина) в пищеварительном тракте подвергаются гидролизу. Получаются более простые вещества — аминокислоты. Они всасываются в кровь, и из них уже организм строит свои собственные белки (см. стр. 696).

Растительное масло получают из конопли, льна и подсолнечника.



Посмотрим теперь, что же происходит с белками в нашей кухонной лаборатории. Белок яйца на сковородке свернулся, стал не растворимым в воде, но он, конечно, сохранил свои питательные свойства. Свернувшиеся белки мяса мы наблюдаем в виде хлопьев на поверхности супа. Чтобы он имел более красивый вид, хозяйки удаляют их. Этого делать не следует, так как с белковыми хлопьями суп будет питательней.

Если дома при варке супа хотят иметь вкусное мясо, посоветуйте опускать его в кипящую, а не в холодную воду. Белки мяса при этом быстро свернутся и закроют выход из мяса в суп другим белкам и вкусовым веществам. Мясо станет вкусным, но бульон будет не особенно приятным. Наоборот, если хотят получить наваристый бульон, то мясо следует опускать в холодную воду. Белки и вкусовые вещества мяса при этом будут беспрепятственно переходить в суп. Мясо в этом случае получится довольно пресным, но суп будет вкусным.

Знание свойств белков объяснит нам еще одно явление, которого мы уже немного касались. Когда речь шла о выпечке хлеба, не возник ли у вас вопрос: «Почему хлеб остается пористым даже после того, как углекислый газ улетучился из него?»

Возьмите немного муки, заверните в реденькую тряпочку и, как ранее с тертым картофелем, отмойте из нее крахмал. На тряпочке останется белок — клейковина. Он недаром так назван, вы даже на ощупь можете убедиться в его клейкости. Теперь уже ясен ответ: клейковина образует вокруг пузырьков углекислого газа прочную пленочку, которая остается и после того, как углекислый газ вырвется наружу.

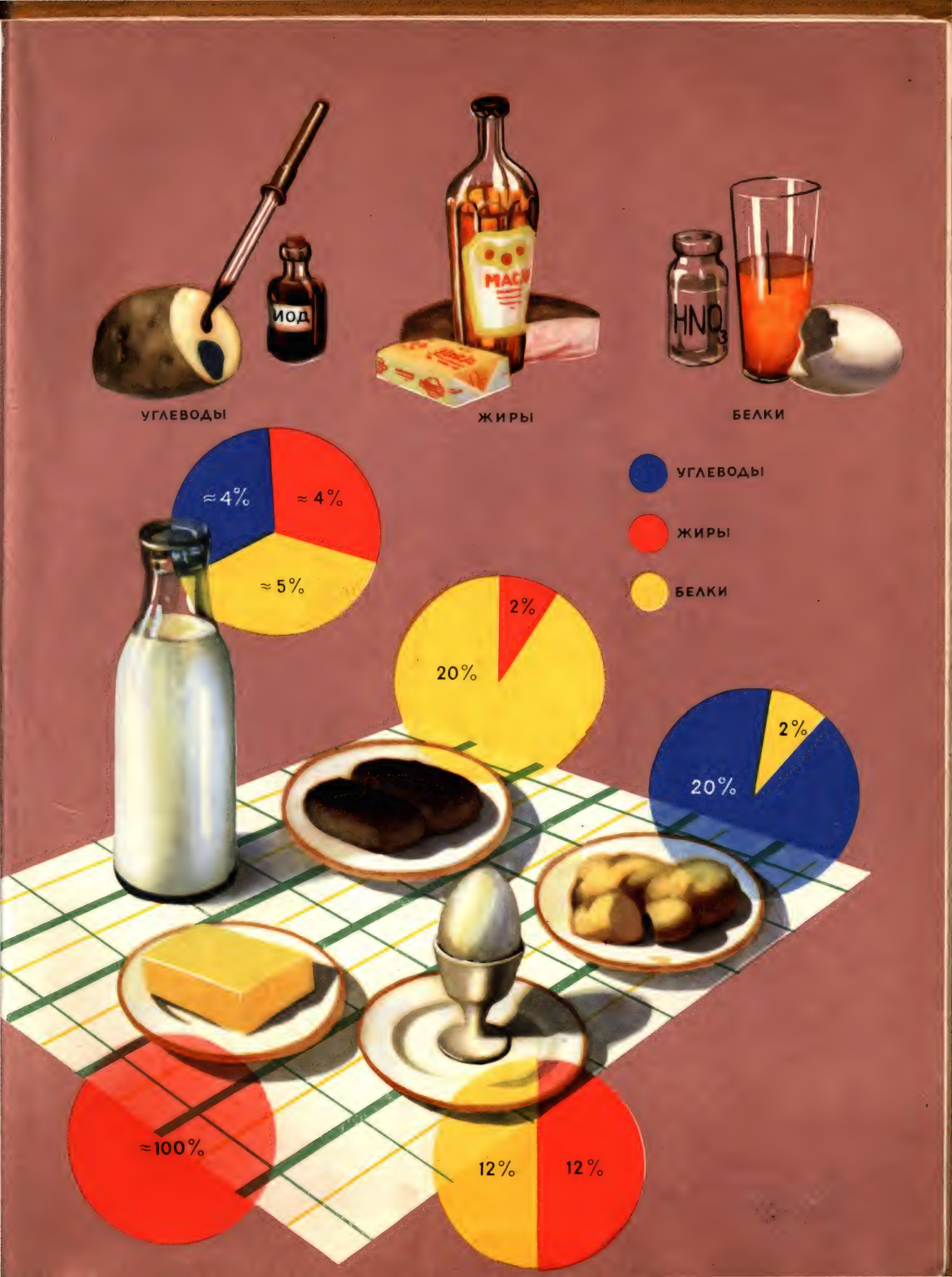
Есть простой способ распознавания белковых веществ по их запаху при горении. Но мы познакомимся с более совершенным, чисто химическим способом.

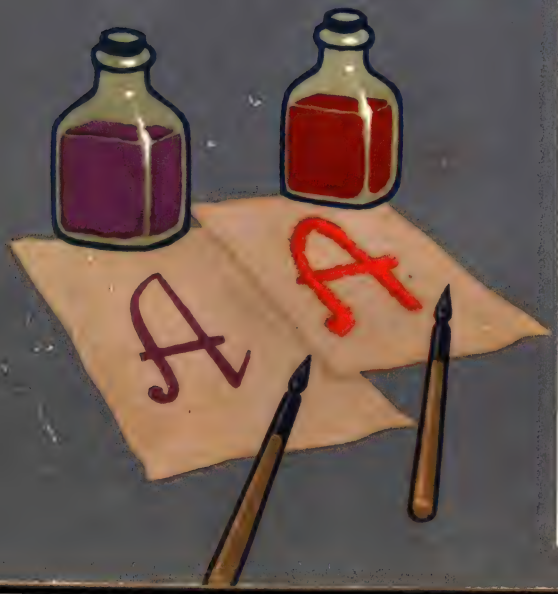
Разбавьте белок куриного яйца водой, добавьте раствор щелочи, затем несколько капель раствора медного купороса и слегка нагрейте. Появляется фиолетовая окраска. Теперь, зная эту реакцию, пускайтесь с ней в исследования по вашей «лаборатории». Прокипятите кусочек мяса или возьмите немного супу и испытайте его при помощи щелочи и медного купороса. Испытайте клейковину, кусочек рыбы. Покипятите со щелочью шерсть или волосы и проверьте, дадут ли они фиолетовое окрашивание. Или другой способ. Прибавьте к разбавленному водой белку несколько капель концентрированной азотной кислоты, и вы заметите белый, постепенно желтеющий осадок. Желтые пятна на руках у тех, кто неаккуратно обращается с азотной кислотой,— результат реакции кислоты с белками кожного покрова.

В заключение нашей экскурсии по домашней лаборатории займемся исследованием молока. Это замечательное сочетание всех необходимых для питания человека веществ, о которых мы только что говорили. Недаром одним только молоком матери питается начинающий жизнь ребенок. В каждых 100 *Г* молока содержится примерно по 4 *Г* углеводов и жиров и 5 *Г* белков; есть в нем и витамины.

Молоко при стоянии покрывается слоем сливок. Это

Таблица 47. Состав пищевых продуктов: молока, мяса, картофеля, масла, яиц (не считая воды). Вверху—обнаружение крахмала и белка.


ИОД
МАСЛО
HNO_3
УГЛЕВОДЫ
ЖИРЫ
БЕЛКИ
≈4%
≈4%
≈5%
УГЛЕВОДЫ
ЖИРЫ
БЕЛКИ
2%
20%
2%
20%
≈100%
12%
12%



всплывают наверх мельчайшие капельки жира. С виду сливки как будто не похожи на жир. Но вы знаете, что если их сбивать, то получится прекрасное сливочное масло. Снимите сливки с молока ложечкой. Добавьте к снятому молоку несколько капель уксуса. На ваших глазах произойдет створаживание молока. Это свертывается белок — казеин. Отделите творожистую массу от сыворотки и проделайте с белком ту или иную известную вам цветную реакцию.

Сыворотка представляет собой раствор в воде углевода — молочного сахара — и некоторого количества солей. Молочный сахар очень похож на обычный и легко усваивается молодым организмом. Именно молочный сахар, а не крахмал представляет здесь класс углеводов.

Скисание молока часто происходит без добавки уксуса, под действием образующейся в самом молоке кислоты. В воздухе всегда носятся так называемые молочнокислые бактерии.

Попадая в молоко, эти бактерии вызывают брожение молочного сахара. При этом образуется молочная кислота, под действием которой и свертывается казеин.

Если молоко долго стояло, и вы боитесь, что оно может свернуться при кипячении, добавьте в него немножко питьевой соды. Она нейтрализует кислоту, и молоко можно безбоязненно кипятить.

Теперь, когда вы сядете за обед или завтрак, вы можете о многом поразмыслить. Подумайте, из чего приготовлено каждое ваше блюдо, и представьте себе всю цепь химических превращений потребляемых вами веществ.

Какие же вещества и в каком количестве нужны человеку для ежедневного нормального питания? За сутки человек выделяет примерно 260 *Г* углерода в виде углекислого газа и около 20 *Г* азота в виде мочевины. Эти 280 *Г* должны ежедневно возвращаться нашему организму в виде пищи. Очевидно, что питаться только углеводами и жирами нельзя, так как в их составе нет азота. Для построения тканей нашего организма непременно нужны белки, в которых содержится азот. Но и питаться только белками тоже нельзя, так как в них азота гораздо больше, чем требуется нашему организму: на каждые 260 *Г* углерода приходится азота не 20, а 80 *Г*. Нужные количества углерода и азота получатся, если, например, взять 130 *Г* белка и 500 *Г* углеводов. Углеводы, как мы знаем, можно заменять в пище жирами. Жиры богаче углеродом, поэтому их можно было бы взять меньше. Однако они заменяют углеводы только частично. При правильном соотношении белков, жиров и углеводов переваривание их равномерно распределяется по пищеварительному тракту и пища лучше усваивается организмом.

Часто состав пищи определяют по калорийности различных продуктов. Человек в процессе своей жизнедеятельности расходует энергию. Ее исчисляют в килокалориях тепла. Ваш организм, например, расходует около 2000 *ккал* в сутки. При тяжелой, физической работе взрослый человек расходует до 5000 *ккал*. Эта энергия получается за счет окисления в нашем организме белков, жиров и углеводов. Каждый грамм белка или углевода дает при этом 4,1 *ккал*, а один грамм жира — 9,3 *ккал*. Теперь нетрудно подсчитать, что для получения, например, 3000 *ккал* в сутки надо иметь в пище около 100 *Г* белков, около 70 *Г* жиров и около 500 *Г* углеводов.

Как видно, этот способ подсчета приводит в общем к тем же результатам, что и ранее изложенный.

ИСКУССТВЕННОЕ ПОЛУЧЕНИЕ ПИЩЕВЫХ ПРОДУКТОВ

Итак, основные элементы продуктов питания человека и животных — это жиры, углеводы и белки. Можно ли получить их искусственным путем?

Еще в 1854 г. Бертело удалось синтезировать жиры, нагревая глицерин с жирными кислотами. После этого задача синтеза жиров свелась к поискам экономически выгодного

Таблица 48. Окрашенные в пурпурный цвет ткани, в частности мантии древних владык (верхний рисунок слева), были достоянием лишь высшей знати — императоров и их сановников; в средние века окраска тканей красителем индиго была доступна тоже только высшему сословию общества — феодалам, богатым рыцарям и другим «власть имущим» членам общества (рисунок в середине). В наше время ткани, окрашенные любыми красителями, доступны всем и каждому (нижний рисунок справа). Каждый краситель имеет свои «прицепные» группы атомов, которые «связывают» его с окрашиваемым материалом. Доказательством могут служить опыты с погружением полосок бумаги в фиолетовые и красные чернила (рисунок вверху справа), а также «проба пера» этими чернилами (рисунок внизу слева).

способа производства исходных веществ — глицерина и жирных кислот. Впервые промышленный синтез пищевых жиров был осуществлен в Германии в годы второй мировой войны. Глицерин получали из пропилена — одного из газообразных продуктов расщепления (крекинга) нефти. Жирные же кислоты синтезировали из угля и воды следующим образом.

Полученную из угля и воды при высокой температуре смесь окиси углерода и водорода превращали в смесь углеводородов, называемую синтином. Затем его окисляли при повышенной температуре в присутствии катализаторов. В результате образовывались жирные кислоты.

При нагревании глицерина с кислотами получались жиры. Они имели одно лишь отличие от природных пищевых жиров. Природные жиры — это продукты соединения глицерина только с такими жирными кислотами, молекулы которых содержат четное число углеродных атомов. А искусственные жиры получались из смеси кислот, содержащих как четное, так и нечетное число углеродных атомов. Оказалось, что человеческий организм усваивает эти жиры не хуже естественных.

Полученные описанным выше путем жиры были бесцветны, а по консистенции напоминали сливочное масло. Их подкрашивали в слегка желтоватый цвет и витаминизировали. Таким путем в Германии были изготовлены и употреблялись в пищу десятки тысяч тонн заменителей сливочного масла.

История исследований по синтезу углеводов, или сахаров, также насчитывает почти столетие. Первый синтез сахара осуществил А. М. Бутлеров. Полученный им из формальдегида метиленитан, относящийся к классу сахаров, был смесью нескольких сахаристых веществ. Однако эти вещества не усваиваются организмом человека. Наш организм может усваивать молекулы сахаров лишь со строго определенным расположением атомов в пространстве. Так, из многих десятков изомерных сахаров состава $C_6H_{12}O_6$ он предпочитает только два — глюкозу и фруктозу. Синтетические же сахара — это пестрая смесь продуктов самого различного пространственного строения.

Временные затруднения с синтезом сахаров еще не означают, что их в настоящее время вообще нельзя получить искусственным путем. Химики использовали здесь другой путь. При изучении строения молекул клетчатки было установлено, что эти молекулы-гиганты состоят из многократно повторяющихся звеньев-молекул виноградного сахара (глюкозы). Возникла идея разрушить молекулы клетчатки и получить виноградный сахар. Это легко осуществить, нагревая древесину с разбавленными кислотами.

Сложнее всего обстоит дело в настоящее время с проблемой синтеза белковых веществ. Ведь они имеют чрезвычайно сложное строение. Здесь лишь намечаются пути подхода к решению проблемы.

80 лет назад А. Я. Данилевский предпринял первые попытки синтезировать белки с помощью энзимов (энзимы, или ферменты,— органические катализаторы, образующиеся в живых организмах; о них подробно рассказано на стр. 639).

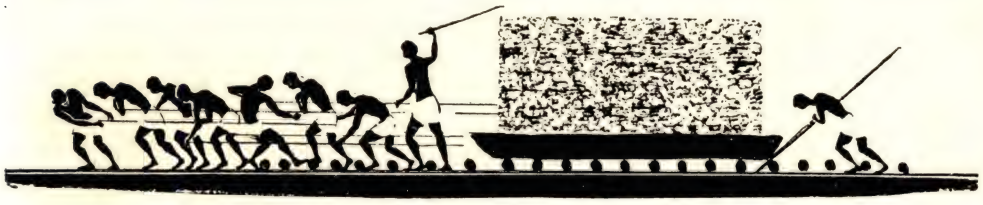
Ученый нашел, что энзим пепсин способен не только расщеплять, но при определенных условиях выполнять и обратную роль, т. е. синтезировать белковоподобные вещества из продуктов их расщепления. Такие белковоподобные вещества — пластеины — имели молекулярный вес от 2000 до 6000.

Однако энзиматический синтез белковых веществ не полон, так как в этом случае в качестве исходных веществ применяются продукты гидролиза самого белка, представляющие собой сложную смесь веществ далеко не выясненного строения.

ХИМИЧЕСКИЕ ИСТОЧНИКИ СИЛЫ

В течение веков для создания материальных ценностей использовалась мускульная сила людей и животных. Но в XVIII в. выяснилось, что железные части машин выносливее, проворнее и сильнее, чем живые мускулы. Наступил век машин. Но машины, как и люди, требовали пищи, и она была найдена в виде каменного угля и нефти.

Нефть и уголь сохранились в недрах Земли с доисторических времен, когда по земле еще не ступала нога человека, как бы в предвидении такого момента, когда появится нужда в по-



стоянном и удобном источнике двигательной силы для фабрик, автомобилей, самолетов.

Нам нужна энергия как источник двигательной силы. Следовательно, нам нужны вещества, которые служили бы вместилищем энергии и в которых она могла бы спокойно дремать до тех пор, пока не понадобится. Таким источником энергии, связанным с веществом, служит энергия химического сродства, освобождающаяся при химических реакциях. Удобнее всего для этой цели использовать химическое сродство элементов к кислороду, так как он доступен всюду. Таким образом, мы приходим к горючим веществам, как наиболее простому способу удовлетворения нашей потребности в удобных источниках энергии.

Какие еще пожелания мы предъявили бы к «идеальному» горючему для двигателей? Прежде всего, чтобы его не трудно было хранить и перевозить. Желательно также, чтобы продукты горения легко удалялись из камеры сгорания, не засоряя ее, и не отравляли атмосферу. Первому условию — легкости хранения, погрузки и транспортировки — наиболее удовлетворяют жидкие вещества. Продукты их горения для выполнения второго требования должны быть обязательно летучи. Тогда удаляться они будут автоматически.

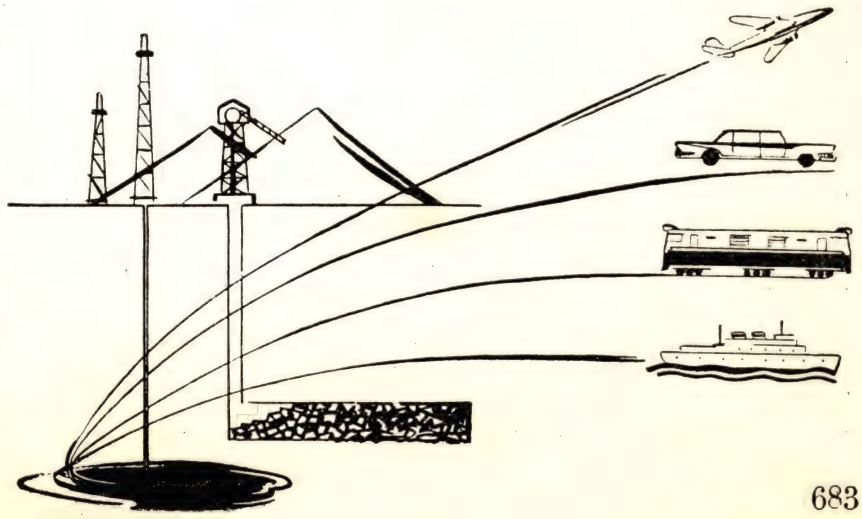
Такое горючее и доставляет нам природа в виде нефти. Казалось бы, химику тут нечего делать — только разделять природную нефть на фракции с различной степенью летучести, соответственно специальным требованиям двигателей разного типа — авиационных, автомобильных и тракторных, дизельных. Так, топливо для поршневых авиадвигателей — авиационный бензин — должно выкипать в пределах температур 40—180° и замерзать не выше —60°.

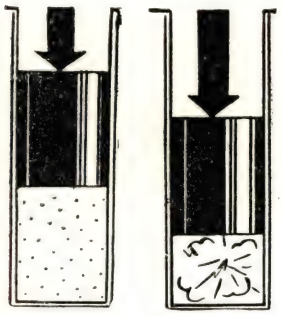
Но вскоре и здесь химикам нашлось дело. После первой мировой войны авиация и автотранспорт начали развиваться так стремительно, что бензина прямой гонки для них стало не хватать. Возникла задача создать искусственный бензин. И она вскоре была решена сразу несколькими способами. Самым ценным из них оказался крекинг — расщепление высококипящих нефтепродуктов,— впервые запатентованный в России инженером В. Г. Шуховым.

Углеводороды тем более летучи, чем легче их молекула. Строение ее здесь почти не играет роли. Молекулы разного строения, но заключающие в себе одинаковое число углеродных атомов, обладают приблизительно одинаковой летучестью. Крекинг в том и заключается,что под действием высоких температуры и давления расщепляются громоздкие молекулы углеводородов, скопившиеся в тяжелых погонах нефти — газойле, соляровом масле, мазуте,— на легкие и подвижные «осколки», пригодные для питания авиадвигателей. Это реакция как раз противоположная реакции полимеризации.

Но вскоре перед химиками — творцами искусственного моторного топлива — возникли новые, более трудные задачи, для решения которых вновь потребовалось вмешательство структурной теории.

В первых двигателях внутреннего сгорания в качестве двигательной силы использовалось не более $^1/_2$ энергии, заключенной в питающем их жидком топливе. Уже это представлялось великим достижением, так как коэффициент полезного действия доброй старой паровой машины не превышал каких-нибудь 5%. Но рас-





четы убедительно показали, что это не предел. Коэффициент полезного действия двигателей внутреннего сгорания можно и далее наращивать весьма простым, с точки зрения конструктора, способом: создавая двигатели со все большей и большей степенью сжатия. А каждый лишний процент в коэффициенте полезного действия означает лишние километры пробега автомобиля или полета самолета при том же самом расходе горючего, повышает развиваемую самолетом скорость и его «потолок».

До какого же предела можно увеличивать степень сжатия рабочей смеси в двигателе? Оказывается, лишь до того предела, который допускается топливом. Как только этот предел достигнут, нормальное сгорание топлива, придающее плавный ход поршню, нарушается. Начинается детонация, взрывы горючей смеси в цилиндре, и мотор быстро выходит из строя.

Теперь представьте себе, что перед вами две горючие жидкости, не отличимые одна от другой ни по запаху (и у той и у другой всем знакомый запах бензина), ни по другим внешним признакам. Более того, у них одна и та же плотность, если измерять ее не слишком чувствительными приборами, почти одна и та же точка кипения и т. д. Одинаков у них и состав молекулы — C_5H_{12}. Оба вещества одинаково ведут себя в двигателях с малыми степенями сжатия, но при больших степенях сжатия одно детонирует, а другое нет. Иначе говоря, одно остается полноценным топливом, а другое становится в данных условиях топливным браком, на нем мотор работать не может.

В чем же тут дело? Раз состав молекул обоих веществ одинаков, разница может заключаться лишь в строении молекул. Так оно и есть. На рис. 1 под буквой *а* представлена структура молекулы «благополучного» горючего вещества, а под буквой *б* — «неблагополучного». В первой молекуле цепочка из углеродных атомов разветвляется, во второй — нет.

Естественно предположить, что углеводороды с еще более разветвленной цепью углеродных атомов окажутся еще более стойкими против детонации. Так и есть на самом деле. Из-за сильной разветвленности углеродной цепи один из изомеров октана долгое время оставался непревзойденным авиационным горючим по своей стойкости против детонации. С ним сравнивали стойкость против детонации всех авиационных бензинов, выражая ее «октановым числом» и приписав самому изооктану октановое число 100. Недаром английские наблюдатели, анализируя опыт первых воздушных боев на Западном фронте в начале второй мировой войны, открыли «закон»: в воздушном бою побеждает летчик, в баках самолета которого содержится бензин с наибольшим октановым числом.

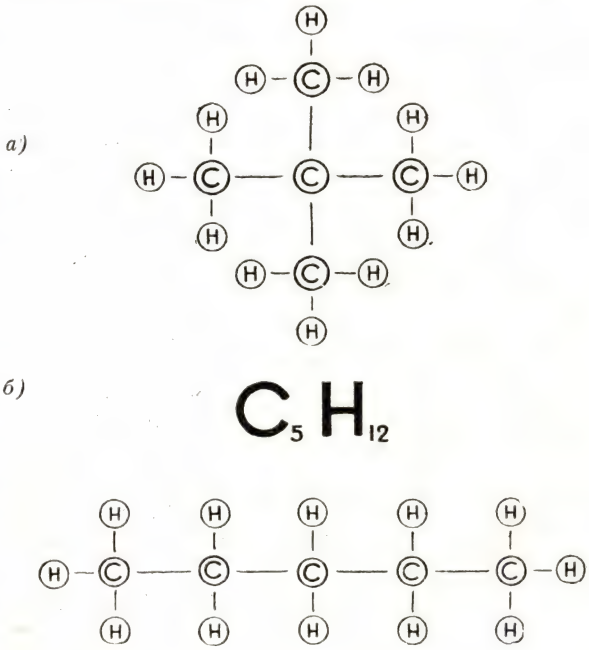


Рис. 1.

В бензинах прямой гонки всегда содержится изооктан, но в очень малом количестве. И вместо того чтобы извлекать его из нефти, химики вступили на путь синтеза — искусственного получения изооктана. Удобным сырьем для синтеза изооктана оказались отбросные газы крекинга, состоящие из низкокипящих углеводородов, в том числе изобутана. Способа же превращения изобутана в изооктан не пришлось открывать заново. Оказалось, что секрета здесь никакого нет. Его производят точно так, как он впервые был получен в малом количестве в лаборатории семьдесят лет назад основоположником учения о строении молекул А. М. Бутлеровым.

Но, когда в авиацию вместо поршневых пришли реактивные двигатели, когда появились

мощные баллистические ракеты, требования к горючему в корне изменились. Здесь особенно важно, чтобы в наименьшем весе горючего было сосредоточено наибольшее количество энергии. Вопрос же о детонации отпадает.

В качестве источника химической энергии, кроме горючих, широко используются взрывчатые вещества. В их составе, кроме углеродных и водородных, есть атомы азота и кислорода. Но, чтобы понять, почему такие вещества взрывчаты, опять нужно обратиться к строению их молекул.

На рис. 2 представлена структура молекулы тола. Горючесть горючих веществ проистекает от того, что атомы углерода и водорода обладают большим химическим сродством к кислороду и стремятся соединиться со свободным кислородом в молекулы воды и углекислого газа. Это и происходит при горении. В молекуле тола уже содержатся атомы кислорода. Но они не связаны еще с атомами водорода и углерода, а отделены от них «барьерами» из атомов азота. Молекула находится в напряженном состоянии, подобно взведенному курку, которому мешает ударить по патрону механизм «собачки». Поэтому легко понять, что нагревание, удар, иногда «невыясненная причина» способны вызвать крушение этого неустойчивого сочетания атомов.

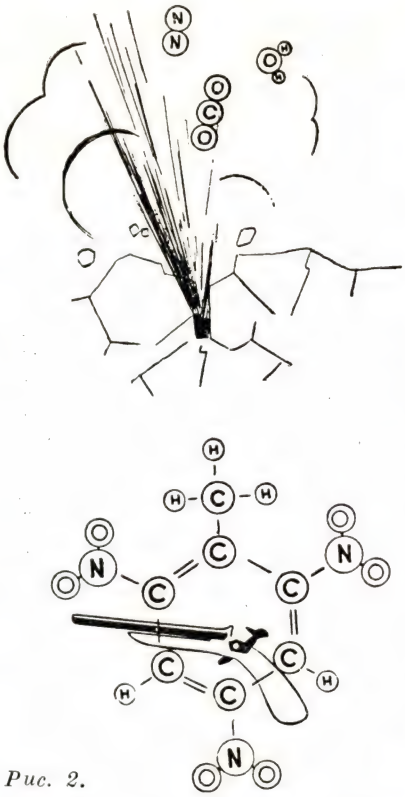


Рис. 2.

Атомы азота выбрасываются из молекулы прочь и, связываясь попарно, образуют молекулы N_2. Атомы же кислорода устремляются по освободившимся путям к атомам водорода и углерода. С первыми они сочетаются в молекулы водяного пара, а со вторыми — в молекулы углекислого газа и окиси углерода.

Из одной молекулы тола образуется до десятка молекул разных газов. Но газы стремятся беспредельно расширяться и оказывают при расширении тем более сильное давление на внешние препятствия, чем в большем количестве они сосредоточены в данном пространстве и чем сильнее нагреты. Если заряд тола был заложен в узкую трещину в скале, внезапное образование большего количества сильно нагретых газов действует на стенки трещины, как страшный удар изнутри. Скалы дробятся, и осколки выбрасываются хлынувшими газами.

В качестве «барьера» в молекулах взрывчатых веществ пытались применять и атомы других элементов. Еще в начале прошлого века французский ученый Бертолле предложил применять для этой цели атомы хлора. Но быстро построенный завод к концу первого же дня работы был превращен страшным взрывом в груду развалин. Барьер из атомов хлора оказался недостаточно надежным и прорвался прежде, чем это было необходимо.

Основные качества работы взрывчатых веществ — необычайная сила и быстрота — создают им в ряде случаев неоспоримые преимущества перед горючими веществами. При их помощи прокладываются туннели сквозь горные массивы, добываются миллионы тонн руды, лесные участки превращаются в пахотную землю и совершается много других полезных дел.

КАК БЫЛИ СОЗДАНЫ ИСКУССТВЕННЫЕ КРАСКИ И АРОМАТИЧЕСКИЕ ВЕЩЕСТВА

Человеку свойственно стремление к красоте. Раскопки доисторических жилищ и рассказы путешественников о быте отсталых народов свидетельствуют о том, сколько прилагалось усилий и изобретательности, чтобы украсить жизнь даже на первых ступенях цивилизации. И прежде всего в поисках красящих веществ человек обращался к сокровищнице природы.

Природа необычайно богата красками, но большинство их оказалось непригодным для практических целей, главным образом из-за непрочности. Поэтому, чтобы найти вещества,

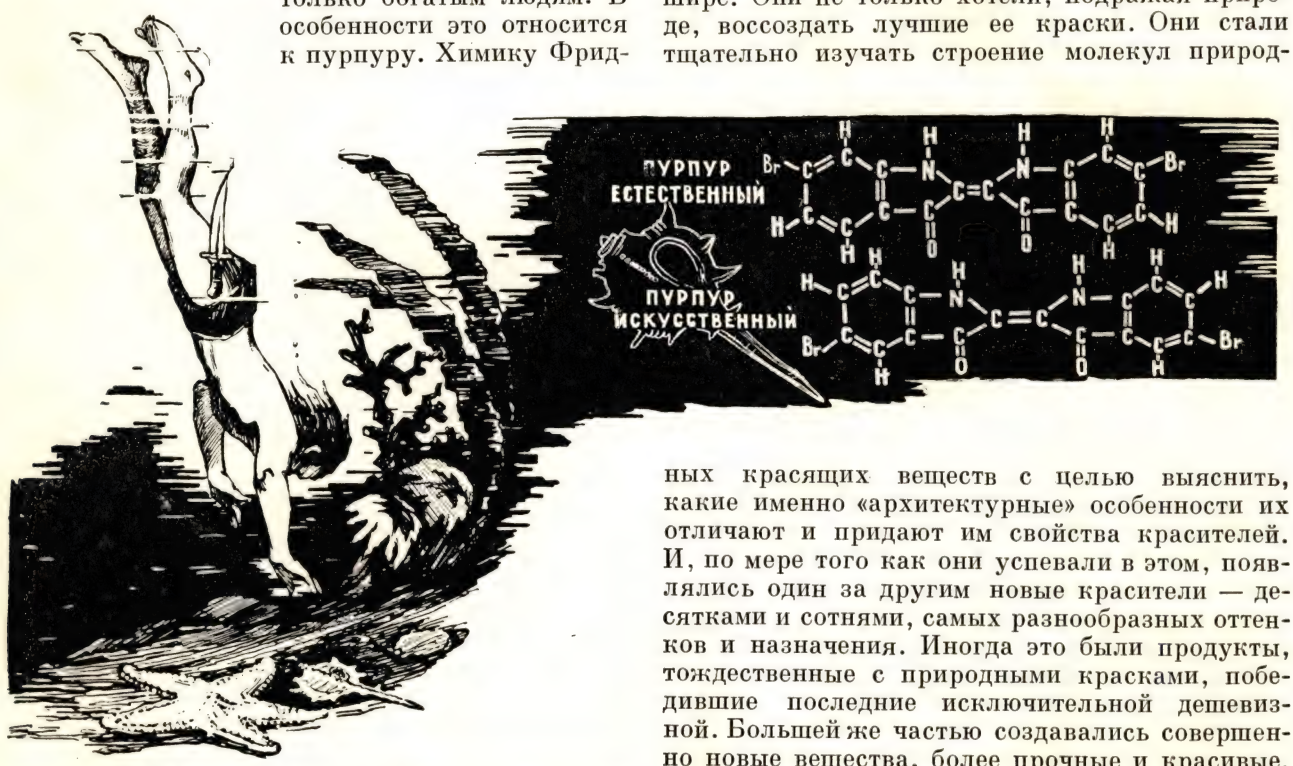
действительно пригодные быть красками, людям пришлось нырять глубоко в море, чтобы похитить у моллюска «мурекса» каплю бесцветной жидкости, превращающейся от действия солнца и воздуха в пурпур. Пришлось возделывать миллионы гектаров земли в Азии и Европе под растения, из которых получаются ализарин и индиго. Эти старинные краски настолько прочны, что до сих пор не выцвели окрашенные ими материи, извлеченные из древнеегипетских гробниц. Пришлось собирать миллионы тлей особого вида, чтобы, высушив их, получить очень красивую краску — кошенильь.

Естественно, что краски, добытые с таким трудом, стоили очень дорого и были доступны только богатым людям. В особенности это относится к пурпуру. Химику Фридлендеру, чтобы установить строение молекулы пурпура и получить 1,4 *Г* этой краски, пришлось переработать 12 тыс. улиток. Судя по этому, окрашивание пурпуром царской мантии должно было обходиться в сотни тысяч рублей. Когда-то ношение пурпурных одежд служило признаком принадлежности к высшему слою господствующего класса.

Теперь тысячи красок самых разнообразных оттенков и разнообразного назначения получают на химических заводах. Каждый может купить пакетик краски и, растворив ее в воде, покрасить платье в любой цвет.

Химики прежде всего принялись за изучение строения молекул красящих веществ. Немецкие капиталисты, которые здесь оказались смелее и дальновиднее других, не побоялись затратить миллионы рублей на помощь ученым, занявшимся изучением индиго и ализарина. Когда же строение этих молекул было раскрыто, изыскать способы искусственного получения их было уже не очень трудно. На рынок пошли огромные партии необычайно дешевых искусственных индиго и ализарина, и разведение ализариновых и индигоносных растений быстро прекратилось.

Но химики поняли свою задачу гораздо шире. Они не только хотели, подражая природе, воссоздать лучшие ее краски. Они стали тщательно изучать строение молекул природных красящих веществ с целью выяснить, какие именно «архитектурные» особенности их отличают и придают им свойства красителей. И, по мере того как они успевали в этом, появлялись один за другим новые красители — десятками и сотнями, самых разнообразных оттенков и назначения. Иногда это были продукты, тождественные с природными красками, победившие последние исключительной дешевизной. Большей же частью создавались совершенно новые вещества, более прочные и красивые.



При этом мимоходом был получен и древний пурпур. Но среди других блестящих и красивых искусственных красок он показался таким невзрачным, что промышленного значения не получил и вначале даже не был узнан. Впрочем, искусственный пурпур содержит в своей молекуле два атома брома в несколько ином расположении, чем природный (см. рис.). Но это не только не оказалось недостатком, а, наоборот, послужило лишь к большему его совершенству. Природа слегка ошиблась, как выразился один

Строение молекулы индиго; внизу — одно из индигоносных растений.

ученый, в размещении атомов брома в пурпуре, и наука исправила ее ошибку.

Любопытно, что в природе молекулы красителей часто построены по одному и тому же шаблону и совершенно не используются другие неисчерпаемые возможности. Молекула прекраснейшей из красок животного мира — пурпура (см. рис. на стр. 686) — очень похожа на молекулу лучшей из красок растительного мира — индиго. Разница лишь в том, что моллюск, обитая в морской воде, содержащей, между прочим, и бромистые соли, «включает» в молекулы своего организма столь редкий элемент, как бром, а растениям это недоступно.

Точно так же в очень близком химическом родстве между собой находятся два важнейших по своему физиологическому значению пигмента растительного и животного мира: хлорофилл — основное красящее вещество растений и гемоглобин — красящее вещество крови. Но эти вещества не следует сопоставлять с красками. Они непрерывно в работе, от которой зависит существование органического мира.

Две первые искусственные краски — фуксин и мовеин — были получены в середине XIX в. из одного и того же вещества анилина, первая — в России Я. Натансоном, вторая — в Англии Перкиным. Благодаря яркости даваемых мовеином тонов он пользовался в течение десятилетия широкой популярностью, несмотря на то что расценивался на вес платины. Особенно сильный толчок новый вид промышленности получил с открытием Н. Н. Зининым способа дешевого получения самого анилина из бензола — одного из продуктов перегонки каменноугольной смолы. С этого времени каменноугольная смола из отбросов производства металлургического кокса превратилась в драгоценное сырье промышленности искусственных красителей, а сами эти красители долгое время носили название анилиновых. Из каменноугольной смолы получают также антрацен — исходное сырье для синтеза ализарина и родственных ему красителей.

Ализарин окрашивает материю в ярко-красный цвет. Такие материи носят название кумача. Они очень красивы, но самый процесс крашения ализарином длителен, сложен, кропотлив — очень неудобен в массовом производ-

Миллионы гектаров земли занимали под растения, из которых получали ализарин и индиго.

стве. Поэтому сейчас почти исключительно применяют искусственные краски, которых нет в природе. Посмотрите, как построена молекула одной из наиболее простых—хризоидина.

Она состоит из двух частей, соединенных между собой «мостиком» из двух связанных атомов азота (см. рис. на этой странице). Этот мостик и служит причиной того, что это вещество окрашено в оранжевый цвет. Это — хромофор, в переводе — носитель окраски. Части молекулы, скрепленные мостиком из азотных атомов с двойной связью, бывают более сложными, но не более простыми. Так как химик может перестраивать и надстраивать молекулы, то оттенки и прочность изготовляемых красок находятся в его руках.

Хромофорами могут служить (т. е. придавать соединению окраску) и некоторые другие атомные сочетания с двойной связью. Но искусственные красители, в которых хромофор — это сочетание из двух атомов азота, скрепленных двойной связью (так называемые азокрасители), наиболее многочисленны. Они отличаются дешевизной и среди них есть представители всех цветов и оттенков. Простейшие азокрасители — желтого и оранжевого цвета. С усложнением молекулы появляются новые цвета и оттенки — красный, синий, фиолетовый, вплоть до коричневого и черного.

Но красивый оттенок и прочность — это еще не все для краски. Ведь нельзя, чтобы при первой же стирке краска начисто вымывалась из одежды? Чтобы этого не случилось, в молекулу вводят специальные группы атомов, играющие при крашении роль своего рода крючков или зацепок. В случае хризоидина роль такого «крючка» выполняют две аминогруппы: NH_2 (см. рисунок).

Необходимо отметить, что аминогруппы играют и другую важную роль: они углубляют цвет красителя. Если их удалить из молекулы хризоидина (заменив, например, на атомы водорода), то вещество из оранжевого станет желтым. Поэтому такие группы, как аминогруппы, называются ауксохромами (усилителями цвета).

Впрочем, если вы закажете химику краску, он прежде всего осведомится, что именно вы собираетесь красить. Дело в том, что успех крашения зависит не только от строения красителя, но и от химической природы ткани, а также способа крашения.

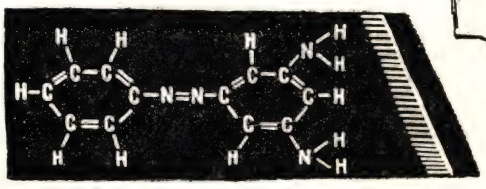
Процесс крашения, т. е. такой фиксации красителя волокном, при которой окраска не смывается водой и мылом, весьма сложен и недостаточно выяснен. В одних случаях краситель удерживается тканью за счет сил адсорбции (точно так же, как активированный уголь в противогазе задерживает вредные газы). Примером может служить окрашивание хлопка или бумаги красителем конго-красный. В других случаях краситель образует с тканью химическое соединение.

Таким путем окрашиваются, например, животные волокна (шелк и шерсть), содержащие группы атомов основного характера (NH_2), красителями кислотного характера, содержащими кислотные группы SO_3H, COOH и др., играющие роль «зацепок».

Зачастую для прочной фиксации красителя волокном требуется добавка так называемых протрав, т. е. таких веществ, которые прочно связываются одновременно и с красителем и с волокном. Протравами чаще всего служат соли и гидраты окисей металлов, например уксуснокислый алюминий, соли железа, хрома, олова.

Иногда, как например в случае крашения индиго, на волокно наносится растворимое в воде вещество (лейкооснование индиго). Смоченная этим раствором ткань вывешивается на воздухе и вследствие окисления кислородом воздуха на самом волокне образуется нерастворимый в воде краситель индиго. Такое крашение называется кубовым.

В молекуле природного ализарина нет достаточно надежных «крючков»; поэтому ализарин — протравной краситель. Но если молекулу ализарина снабдить «прицепными группами» в виде сульфогрупп — SO_3H, то этот недоста-



Молекула хризоидина. Мостик из двух атомов азота с двойной связью обеспечивает красоту, а две аминогруппы — прочность окраски.

ток устраняется. Получается новая краска — кислотная ализариновая красная, прочно закрепляющаяся на волокне.

Нетрудно убедиться на очень простом опыте, какое значение имеют «прицепные» группы для прочности связи красителя с окрашиваемым материалом. Подвесьте над чернильницей с обыкновенными (фиолетовыми) чернилами вертикально полоску бумаги так, чтобы она была погружена в чернила лишь нижним концом. Думаете, чернила будут впитываться бумагой и окрашивать ее? Ничего подобного! По бумаге вверх будет подниматься чистая вода.

Совсем другой результат получится при погружении бумажки в красные чернила. Здесь краска поднимется по бумажке вместе с водой, и граница ее подъема лишь немного отстанет от границы подъема воды.

После этого опыта вам станет понятно, почему фиолетовые чернила не расплываются даже на плохой бумаге, а красные—расплываются. Обыкновенные чернила— раствор искусственной краски (метилвиолета), которая имеет основной характер. Молекулы краски притягиваются и удерживаются волокнами целлюлозы. Красные же чернила — раствор эозина. Эозин — кислая краска. Поэтому ее молекулы не притягиваются волокнами бумаги и беспрепятственно поднимаются по бумажной полоске вместе с водой.

В результате бурного развития органического синтеза за какие-нибудь 50—60 лет природные красители были целиком вытеснены синтетическими. Все ткани, которыми мы пользуемся, вся наша одежда окрашены исключительно искусственными красителями.

Самые распространенные синтетические красители — азокрасители. Основным исходным продуктом для их синтеза служит анилин, получаемый по способу Зинина. Им и окрашивают не менее 90% наших тканей. Сейчас известно несколько десятков тысяч азокрасителей. Вот некоторые из них: анилиновый желтый, анилиновый черный, оранжевый I и II, прочный красный А, конго-красный, виктория-фиолетовый.

Одни из наиболее ценных красителей — индигоидные — родственники индиго. К ним относится и пурпур, который теперь стал дешевым. Обширный класс составляют так называемые трифенилметановые красители. Сырьем для их синтеза служат анилин, фенол, нафталин и некоторые другие вещества.

Вот некоторые из этих красителей.

Аурамин — краситель желтого цвета. Его в больших количествах употребляют для крашения бумаги, кожи, искусственного шелка, для получения лаковых красок.

Кристаллический фиолетовый (кристаллвиолет) служит для крашения хлопка, искусственного шелка, кожи, для изготовления фиолетовых чернил и «химических» карандашей.

Флуоресцеин дает в присутствии щелочей интенсивное зеленовато-желтое окрашивание. Если в 40 *Т* воды растворить только один грамм флуоресцеина, то окраска уже видна. Благодаря такой сильной красящей способности им пользуются для того, чтобы проследить путь подземных вод. Флуоресцеин — исходный материал для получения целой группы красящих веществ. Его производное эозин употребляется для окраски шерсти и шелка в прекрасный розовый цвет.

Синтез ализарина послужил отправной точкой для искусственного получения ряда сходных по своему строению ализариновых красителей. Они дают оранжевый, каштановый, синий, черный и другие цвета.

Очень интересны так называемые индантреновые красители. Это синий индантрен, применяемый для крашения хлопка и искусственного шелка; желтый флавантрен; великолепные фиолетового оттенка виолантрон и изовиолантрон. Сначала синтезировали индантрен — из антрацена. Он так сильно напоминал индиго, что его называли «индиго из антрацена». Отсюда и произошло название «индантрен».

Выкрашенные любыми красителями ткани спустя некоторое время тускнеют и теряют свой первоначальный цвет. Если же применить индантреновые красители, то этого не произойдет. Они обладают удивительной прочностью и по своей долговечности превосходят даже окрашенную ими ткань. Более того, они выдерживают действие активных химических веществ при такой высокой температуре, при которой любая ткань мгновенно разрушается. Можно нагреть индантрен на воздухе до 470°, и он не изменится. Можно бросить его в расплавленную щелочь, нагретую до 300°,— он выдержит и это испытание. Не поддается индантрен и действию крепкой соляной кислоты, которая в несколько минут «прожигает» любую ткань.

Такой же необычайной прочностью обладают и другие красители этого класса. Ничего подобного не знает природа!

Царская Россия не имела собственной анилинокрасочной промышленности. В стране существовало только 17 небольших филиалов германских и швейцарских заводов, перерабатывавших на красители импортные продукты. Они ревниво охраняли свои производственные тайны. Сейчас у нас создана мощная анилинокрасочная промышленность, выпускающая десятки тысяч тонн самых различных красителей.

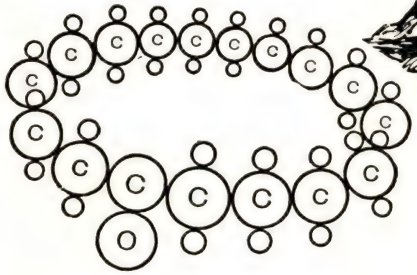
СИНТЕТИЧЕСКИЕ ДУШИСТЫЕ ВЕЩЕСТВА

В цветах содержатся важнейшие природные душистые вещества. Их можно получить из лепестков путем перегонки с водяным паром. Так, например, добывают розовое масло из роз. Из хвойных деревьев получают камфару, различные терпены (вид углеводородов) и другие душистые вещества.

Еще 50 лет назад парфюмерная промышленность пользовалась исключительно природными душистыми веществами. Сейчас широко применяются синтетические.

Из бензола и его производных синтезированы многие приятно пахнущие вещества: анетол, имеющий запах анисового масла, ментол — с запахом мяты, тимол — с запахом тимьянового масла.

Исключительно с помощью органического синтеза теперь получают вещество с запахом свежего сена — кумарин, — встречающееся в растениях (например, в ясменнике). Ванилин — ароматическое вещество ванили — создают из некоторых соединений, находящихся в соке хвойных деревьев. Из скипидара получают терпинеол, обладающий запахом сирени. Синтетическим путем можно получать также эвгенол — масло с сильным запахом гвоздики, гелиотропин — пахучее вещество гелиотропа, ионон — душистое вещество фиалки, коричный альдегид, содержащийся в коричном масле, и др.



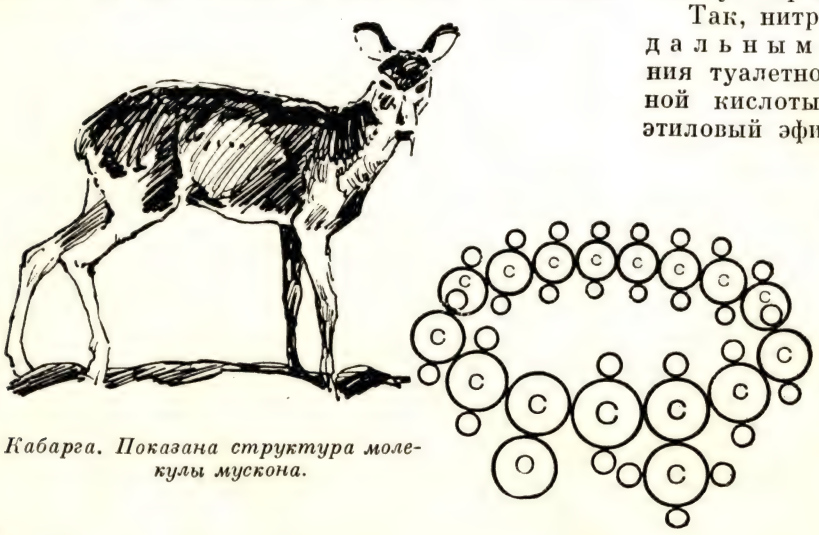
Циветта. Показана структура молекулы цибетона.

В настоящее время парфюмерная промышленность использует в качестве душистых веществ смеси различных химических соединений, например розовое, ландышевое и фиалковое масла́.

Некоторые синтетические душистые вещества не имеют ничего общего со встречающимися в природе одноименными веществами и получили свое название только благодаря сходству по запаху с природными веществами.

Так, нитробензол назван горькоминдальным маслом (идет для отдушивания туалетного мыла); амиловый эфир уксусной кислоты — грушевой эссенцией; этиловый эфир масляной кислоты — ананасной эссенцией и т. д.

Ряд душистых веществ приготовляется из жирных кислот. Помимо грушевой и ананасной эссенций, сюда относятся, например, амиловый эфир изовалерьяновой кислоты — апельсиновая эссенция и изоамиловый эфир изовалерьяновой кислоты — яблочная эссенция. Ими пользуются главным образом для того, чтобы придать соответству-



Кабарга. Показана структура молекулы мускона.

ющий аромат различным прохладительным напиткам, конфетам.

Есть природные душистые вещества и животного происхождения. Из них самые редкие и дорогие — мускус и цибет. Мускус — темное вещество с сильным своеобразным запахом. Его добывают из железы самца кабарги — маленького дикого животного из породы коз, встречающегося в горных областях Азии. Ежегодно убивают около 60 тыс. этих животных, добывая из них около 2 тыс. *кГ* ценного мускуса.

Вещество, которое дает запах мускусу, называется мусконом. В мускусе его содержится всего около 1%.

Цибет раза в три дешевле мускуса. Его добывают из желез африканских циветт — животных из породы кошек. Запах цибету придает находящееся в нем вещество цибетон. Около двадцати пяти лет назад были установлены состав и строение молекул мускона и цибетона. Оказалось, углеродные скелеты молекул мускона и цибетона построены кольцеобразно. Только в мусконе кольцо состоит из 15 атомов, а в цибетоне — из 17 (см. рис. на стр. 690). Вскоре мускон и цибетон были синтезированы. Вместе с тем был синтезирован ряд других веществ, обладающих сходным строением.

В зависимости от числа углеродных атомов в кольце изменяется и запах полученных веществ. Если кольцо включает 5 углеродных атомов, то вещество обладает запахом горького миндаля, 6 — мяты, 7—9 — камфары, 10—13 — кедра, 14—15 — мускуса. При дальнейшем увеличении числа углеродных атомов запах уменьшается и, наконец, исчезает совсем.

ХИМИЯ ЖИЗНИ И ЗДОРОВЬЯ

Когда появилась потребность в химии как подлинной науке, объединяющей практические сведения о превращениях веществ, возник вопрос: чем же конкретно она должна заниматься, в чем должна помогать людям? Тогда же была сделана попытка ограничить задачи химии только помощью врачам в виде изготовления всевозможных лекарств и снадобий. Но для неокрепшей науки такая задача оказалась непосильной. Лишь много позднее появилась возможность, с достаточной надеждой на успех, заняться и теми задачами, которые связаны с лечением людей.

Связь между строением молекулы какого-либо вещества и действием ее на живой организм оказалась настолько сложной, что планомерная работа по изобретению лекарственных веществ, так называемая рациональная химиотерапия, во всякое другое время не смогла бы преодолеть встречающиеся на пути трудности. Тем более преждевременно было навязывать химии медицинские цели тогда, когда она только выходила из мрака алхимических подземелий.

ОСОБЕННОСТИ ДЕЙСТВИЯ ВЕЩЕСТВ НА ЖИВОЙ ОРГАНИЗМ

О трудностях, чрезвычайно характерных именно для данной области химического синтеза, полезно составить наглядное представление прежде, чем знакомиться с ее удивительными достижениями.

Первая трудность состоит в том, что живой организм оказывается особенно разборчивым даже к самым незначительным изменениям в строении молекулы вещества, о чем уже упоминалось в описании путешествия в мир, отраженный в зеркале. Вот характерный пример.

К числу веществ, существующих в виде двух оптических изомеров, относится адреналин. Иначе говоря, существует не один, а два адреналина (рис. 2 — цв. табл. на стр. 692). Один называется левым, другой — правым. Оба имеют одну и ту же структурную формулу, одинаковы по внешнему виду, у них один и тот же удельный вес, одна и та же точка плавления, растворимость и пр. И все же это — два разных вещества, и они по-разному действуют на живые организмы (подробнее о таких веществах сказано в статье «Органические вещества вокруг нас»).

Адреналин играет очень важную роль в химическом «хозяйстве» животных организмов. Его широко применяют врачи при падении кровяного давления, ослаблении деятельности сердца и во многих других случаях.

Адреналин был синтезирован химиками спустя всего 4 года после его выделения в виде бесцветных кристаллов из надпочечников быка. Но синтетический адреналин оказался

вдвое слабее по действию, чем природный. Почему? Потому, что при химических реакциях получаются и левые и правые его молекулы, причем те и другие — в одинаковом количестве. Действуют же на симпатическую нервную систему только молекулы одного вида.

Итак, живой организм оказывается иногда чрезвычайно разборчивым и чувствительным к малейшим изменениям в строении молекул веществ, с которыми он сталкивается. Это — одна из особенностей действия веществ на живые организмы. Другая особенность заключается в необычайной подчас силе действия. Тот же адреналин явственно действует и при введении его в кровь в концентрации всего 1:1 000 000 000.

Другой пример — тироксин (рис. 1 — цв. табл. на стр. 692), вырабатываемый в щитовидной железе млекопитающих. В 1927 г. его получили искусственно. В результате появилась возможность детально изучать действие тироксина на живые организмы. Оказалось, что впрыскивание десятой, даже сотой доли миллиграмма тироксина в кровь головастиков необычайно ускоряет превращение их (как и любой другой личиночной формы животных) во взрослую форму. Так как накопление вещества в организме головастика не успевает следовать за ненормальной быстротой превращения, получаются удивительные «карликовые» породы лягушек.

Химия пришла на помощь медицине, предоставив ей сначала лекарства, полученные случайно (например, хлороформ). Затем она вступила на путь синтеза лекарственных веществ, содержащихся в природных (растительных и животных) материалах. Наконец, путем синтеза были созданы новые сильнодействующие лекарства, не существующие в природе в готовом виде. Рациональная химиотерапия не смогла бы возникнуть, если бы структурная теория не осветила путь к ней.

МОЛЕКУЛЫ ПРОТИВ МИКРОБОВ

Большинство самых разрушительных недугов, поражающих человека, возникает в результате проникновения в его организм различных микробов.

Важным событием в истории медицины была первая операция с применением антисептического — обеззараживающего — вещества, произведенная английским хирургом Листером. Антисептиком послужила карболовая кислота — один из продуктов сухой перегонки каменного угля. До введения в хирургию антисептиков даже легкие операции приводили подчас к смертельному исходу из-за заражения раны микробами. Теперь же эта угроза рассеялась, и смертность от хирургических операций быстро и резко снизилась.

Так был достигнут один из первых успехов в отражении наступления микробов на подступах к живому организму. Но до уничтожения бактерий, уже вторгшихся в организм, было еще очень далеко. Карболовая кислота, убивая микробов, не щадила и живую ткань. Естественно, возникла идея так «отрегулировать» молекулу лекарственного вещества, чтобы, «стреляя» в микроба, не «попасть» в живого человека.

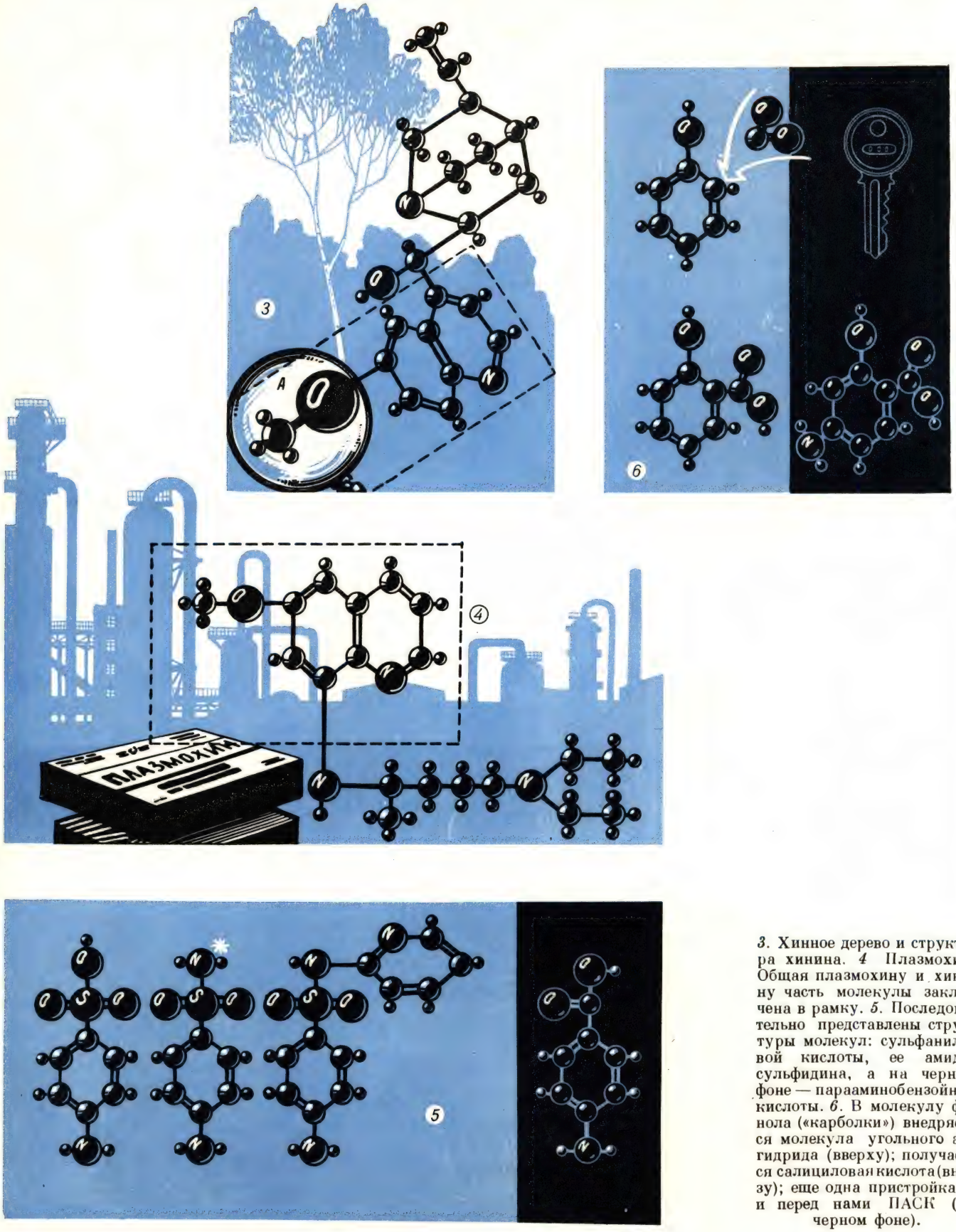
Около 300 лет назад в Европу впервые привезли кору хинного дерева, которой многие были обязаны исцелением от губительной лихорадки. Из коры было выделено ее целебное начало — хинин, белый горький порошок. Со временем химики разгадали строение молекулы хинина, затем получили его искусственным путем. Но дешевых способов синтеза хинина не найдено и до сих пор.

Зато изучение действия чистого хинина на больных-маляриков открыло путь рациональной химиотерапии. В 1860 г. русский врач Романовский, рассматривая в микроскоп каплю крови больного малярией, проходившего курс лечения хинином, увидел, как разрушаются тела бактерий от действия лекарства. В этом исследовании родилась основная формула рациональной химиотерапии: лучшим лекарством против всякой болезни будет то вещество, которое окажет наименьший вред организму больного и вызовет наибольшие разрушительные изменения в болезнетворном микробе.

Естественно, у химиков возник вопрос, достаточно ли молекула хинина отвечает этому условию и не нуждается ли в усовершенствовании. Действие хинина удалось видоизменить и отчасти усилить путем некоторых изменений в молекуле (рис. 3—цв. табл. на стр. 693). Внимание химиков было обращено на наиболее доступную для перестроек ее часть, обозначенную буквой А. Сюда можно присоединить через атом кислорода цепочку из любого числа углеродно-водородных звеньев.

И вот что оказалось. Если молекула состоит из двух звеньев, то получается химическое оружие против одной разновидности наших невидимых врагов, так называемых пневмококков, которые забираются обычно в легкие и вызывают там воспалительные процессы. Стоит увеличить число звеньев до 5, и мы получим

1. Тироксин и вызванное им превращение аксолотля (слева) в амблистому (справа). Буквами обозначены атомы йода, азота и кислорода. *2.* Левый и правый адреналин.



3. Хинное дерево и структура хинина. *4* Плазмохин. Общая плазмохину и хинину часть молекулы заключена в рамку. *5*. Последовательно представлены структуры молекул: сульфаниловой кислоты, ее амида, сульфидина, а на черном фоне — парааминобензойной кислоты. *6*. В молекулу фенола («карболки») внедряется молекула угольного ангидрида (вверху); получается салициловая кислота (внизу); еще одна пристройка — и перед нами ПАСК (на черном фоне).

средство, мало действующее на пневмококков, зато чрезвычайно активное против возбудителей рожи и других накожных заболеваний. Еще одна «пристройка»: присоединяется 8 звеньев — и возникает новое лекарство (вуцин), губительное для стрептококков. При дальнейшем накоплении звеньев бактерицидное действие вуцина исчезает, молекула «испорчена».

Великий немецкий ученый Эрлих, который много работал над изобретением средств для заживления ран, недаром часто сравнивал отношение лекарств к живому веществу с отношением ключей к замкам. Усовершенствованные химией молекулы хинина вполне можно сравнить с обычным ключом, от числа зарубок на котором (соответственно числу углеродно-водородных звеньев в «хвосте» молекулы) зависит, отопрет или не отопрет он данный замок. Через наши руки могут пройти тысячи ключей, прежде чем мы найдем тот, который нужен.

Антисептики подобны заградительному отряду, отражающему натиск врага на подступах к крепости.

Так, исходя из структурной формулы хинина, в лабораториях химиков были созданы новые лекарства, убивающие болезнетворные микроорганизмы и не вредящие живой ткани.

Ну а малярия, в борьбе с которой были заложены основы рациональной химиотерапии?

Руководствуясь общей идеей «архитектурного» плана молекулы хинина, сначала в Германии В. Шулеман, затем в СССР О. Ю. Магидсон создали чисто синтетические противомалярийные препараты — плазмохин и плазмоцид. Они равноценны природному хинину и почти полностью заменили его в нашей стране.

Приведенная на рис. 4 (цв. табл. на стр. 693) структурная формула одного из них (плазмохина) показывает, в каком близком родстве находятся искусственные противомалярийные лекарства с природным хинином (общая всем им часть молекулы выделена рамкой).

ОТ КРАСОК К ЛЕКАРСТВАМ

В настоящее время первое место среди химических средств борьбы с микробами занимают так называемые сульфаниламидные препараты. История их поучительна. Работая над ними, еще в самом начале XX в. химики совсем не помышляли о здоровье людей. Они искали новые пути синтеза красителей, причем брали в качестве исходного продукта сульфаниловую кислоту — чрезвычайно удобное для самых разнообразных перестроек вещество.

Поиски новых красителей увенчались блестящим успехом. Но до 1935 г. никто не подозревал, что получающиеся при этих синтезах продукты представляют собой грозное оружие против самых зловредных микробов. Когда же это обнаружилось, поиски приняли новое направление. Химики теперь вступили в тесное сотрудничество с врачами. Первые синтезировали один сульфаниламидный препарат за другим и передавали их в руки медиков. И врачи тотчас же принимались за проверку действия нового препарата на искусственно зараженных разными микробами животных. Масштабы работы были огромны. Один за другим синтезировались многие тысячи препаратов, чтобы отобрать из них десяток-другой наиболее успешно действующих. Сейчас всем известны названия многих таких веществ: сульфидин, стрептоцид, сульфазол, сульфодимезин и др. Все они получаются из сульфаниловой кислоты путем замещения в ней водорода (отмечен звездочкой) на тот или иной радикал (рис. 5 — цв. табл. на стр. 693).

Знание строения молекул помогло химикам не только создать новые лекарства, но и понять, как именно эти лекарства действуют. Микробы, как и люди, нуждаются в витами-

нах. Таким витамином для них служит параминобензойная кислота. Она присутствует в нашей крови в ничтожных количествах. Если бы ее не было совсем, поселившиеся в нас микробы не погибли бы, но перестали бы размножаться.

Теперь сравните строение молекул этой кислоты и сульфаниловой. Сходство их бросается в глаза. Мы уже сравнивали отношение лекарств к живым организмам с отношением ключей к отпираемым ими замкам. Представим себе, что молекула параминобензойной кислоты — это настоящий ключ, а молекула сульфидина — поддельный ключ. Он вошел в замочную скважину, но не отпер замка, а застрял в нем так прочно, что его не открыть и настоящим ключом. Примерно так мы и представляем себе действие сульфамидных препаратов на микробов.

Как пользуются сульфамидными препаратами?

Прежде всего важно застигнуть болезнь в самом начале, пока бактерии не успели еще слишком сильно размножиться и организм в состоянии справиться с ними своими силами. Затем необходимо поддерживать в организме достаточную концентрацию лекарства, чтобы он мог расправиться с парализованными, но еще живыми микробами. Тогда выздоровление обеспечено.

Если микроб не нуждается в параминобензойной кислоте, то он не поддается действию сульфаниламидных лекарств, и поиски химического оружия против него должны идти в другом направлении. Так был создан ПАСК — препарат, останавливающий рост и размножение смертоносной туберкулезной палочки. Еще в начале XIX в. было известно целебное действие салициловой кислоты при ревматизме. Но, пока ее с большими трудностями добывали только из растительного сырья, она была очень малодоступна. В 1874 г. немецкий химик Кольбе нашел простой способ превращения в салициловую кислоту фенола путем внедрения в его молекулу молекулы угольного ангидрида (рис. 6 — цв. табл. на стр. 693). Это был первый синтез природного лекарственного вещества, с которого началось промышленное производство как самой салициловой кислоты, так и других лекарств, образующихся путем усложнения ее молекулы. Это утоляющий боль и понижающий жар аспирин, дезинфицирующий кишечник салол и др. Как оружие против микробов сама салициловая кислота мало эффективна, но в числе ее производных оказался и ПАСК.

Сравните его с параминобензойной кислотой, и вам вновь бросится в глаза сходство в строении молекул того и другого вещества. Вследствие этого к ПАСКу можно прийти и от салициловой и от параминобензойной кислоты.

Второй путь легче, и он предпочитается, потому что сама параминобензойная кислота легко синтезируется из толуола, одного из отходов коксования углей.

Как витамин, параминобензойная кислота необходима не только микробам: без нее нарушается пигментация волос у человека, шерсти у животных, перьев у птиц. Из нее же, кроме ПАСКа, производятся анестезин и новокаин. Эти вещества тоже замечательны не своим действием на микробов, а действием на организм. Они временно отключают нервы, посылающие в мозг сигналы боли, от мозга, в котором ощущение боли рождается. Оперируемый находится в полном сознании, он все видит и слышит, но не чувствует даже прикосновения скальпеля хирурга к своему телу.

Для местной анестезии впервые был применен кокаин — природный продукт, получающийся из листьев тропического кустарника кока. Но применение кокаина в медицине ограничено вследствие его высокой токсичности. Поэтому лишь с заменой кокаина синтетическим продуктом — новокаином — проблема местной анестезии получила радикальное решение.

Так созидающая химия сыграла решающую роль в разрешении двух основных задач хирургии: обезболивании операций и предохранении операционной раны от попадания инфекции.

УСЫПЛЯЮЩИЕ ЛЕКАРСТВА

Не все недуги проистекают от вторжения в наш организм микробов. Многие болезни вызываются нарушением нормального хода тех или других естественных процессов, из которых слагается жизнь. И здесь созидающая химия, опираясь на изучение строения молекул, пришла на помощь медицине.

Наш организм нуждается в периодическом полном отдыхе, который мы называем сном. К счастью, не так уж много людей испытало на себе, как мучительно нарушение потребности организма в сне и к каким тяжелым последствиям оно ведет. Но лишь эти немногие люди в состоянии оценить, каким благодеянием было открытие снотворного действия барбитуровой кислоты.

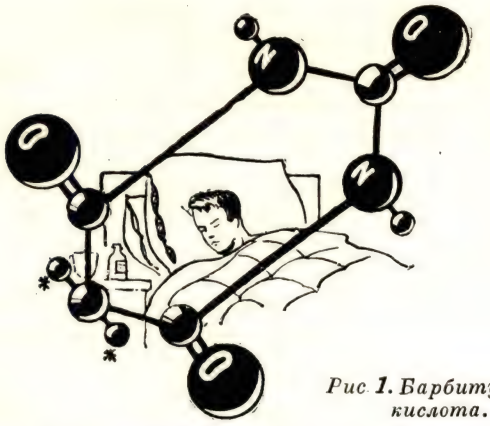


Рис. 1. Барбитуровая кислота.

По обыкновению звездочкой (рис. 1) мы обозначили атомы, особенно легко замещаемые другими атомами или атомными группами. И вместо одного врачи получили из рук химиков целый набор снотворных веществ. Одни из них действуют тотчас же после приема, но вызывают кратковременный сон, другие, в том числе веронал, вызывают сон средней продолжительности. А такие, как люминал, применяются для лечения длительным сном.

ЖИЗНЕННЫЕ КАТАЛИЗАТОРЫ

Еще в 1880 г. русский исследователь Н. И. Лунин произвел поразительный опыт. Он рассадил белых мышей в две клетки и назначил одним молочную диету, других же кормил искусственным молоком, составленным из очищенных веществ, входящих в состав натурального молока,— казеина, жира, молочного сахара и солей. В первой клетке мыши чувствовали себя прекрасно, во второй — гибли одна за другой. Вывод напрашивался сам собой: очевидно, в натуральном молоке, кроме перечисленных, присутствуют в ничтожном количестве какие-то неизвестные вещества, столь необходимые для жизни.

Впоследствии эти вещества были названы витаминами. Недостаток их в пище приводит к тяжелым заболеваниям и к гибели животных и людей. Самое удивительное в витаминах то, что они оказывают свое действие, присутствуя в пище в самых ничтожных, едва поддающихся химическому учету количествах. Суточная потребность человека в том или ином витамине выражается миллиграммами или даже долями миллиграмма. Организм животных и человека сам не вырабатывает витаминов, а заимствует их из растительной пищи.

Итак, перед химиками встала привычная задача: извлечь из растительного продукта содержащийся в нем витамин, установить его структурную формулу и, руководствуясь ею, синтезировать его из каких-либо дешевых и доступных материалов. При этом малейшая ошибка в установлении структуры молекулы витамина или малейшая неточность в воспроизведении этой молекулы искусственным путем приводит к тому, что весь громадный труд пропадет даром.

Каков же итог? За последние 15—20 лет установлена химическая природа более чем полутора десятков необходимейших для человека витаминов. Эти драгоценные вещества, очень скупо рассеянные в природе, сейчас тоннами производятся на заводах.

В прошлом вспышки авитаминозов — болезней, проистекающих от витаминного голода,— были обычным явлением во время войн и в армиях и среди мирных жителей. Еще и сейчас авитаминозы поражают малоимущие слои населения даже в таких богатых капиталистических странах, как США. В Советском Союзе массовых авитаминозов нет. В этой победе выдающаяся роль принадлежит нашей химии.

Витамины — новое удивительное подтверждение чрезвычайной чувствительности живого организма к химическим воздействиям. В чем же здесь дело? Быть может, недоумение будет хотя бы отчасти рассеяно при помощи одной аналогии с техникой. В ее различных отраслях, особенно в электротехнике, широко применяют реле (см. т. 5 ДЭ). Такими «химическими реле» по отношению к живому организму и служат витамины.

Сходную с витаминами роль в нашем организме играют гормоны. В самом начале статьи мы познакомились с двумя из них — адреналином и тироксином.

Гормоны — это химические регуляторы жизненных функций нашего организма. Предположим, что внезапно вас что-то сильно испугало или рассердило. Тотчас по сигналу из мозга надпочечная железа выдавливает в кровь незначительную капельку адреналина. Под его влиянием тонкие кровеносные сосуды, доставляющие кровь мышцам рук и ног, расширяются, сердце начинает биться учащенно и сильно, и таким образом весь организм приводится в состояние готовности энергично реагировать на угрожающую ему опасность.

В отличие от витаминов гормоны не поступают в животный организм извне. Они вырабатываются в самом организме, в специализиро-

ванных «фабриках» — железах внутренней секреции. Понятно, что нужда в том или другом гормоне у животного и человека может возникнуть лишь в случае нарушения нормальной деятельности соответствующей железы. И это случается.

Пока гормонами не занялась созидающая химия, эти вещества, как и витамины, добывались с величайшим трудом из организмов животных. При этом приходилось перерабатывать многие тонны сырья, чтобы получить миллиграмм гормона — столько, сколько весит булавочная головка. А когда было установлено строение их молекул, то стало сравнительно легко находить пути их искусственного получения. Сейчас гормоны применяют для лечения многих болезней, в зоотехнии для повышения продуктивности сельскохозяйственных животных.

Прошло немногим более ста лет после того, как научный мир был ошеломлен известием, что искусственным путем в обыкновенной химической колбе впервые получено органическое вещество — мочевина. И вот сегодня — уже не в отдельных колбах, а в реакторах химических заводов — получают ряд витаминов и гормонов — веществ, принимающих самое непосредственное, самое деятельное участие в жизненном процессе!

НА ПУТИ К ИСКУССТВЕННОМУ СОЗДАНИЮ ЖИЗНИ

Мы давно перестали видеть что-то особенно замечательное в том, что многие продукты лаборатории тождественны с теми или другими произведениями природы. Скорее мы склонны увлечься идеей создания веществ, которых в природе нет и не может быть.

Но в одной области искусство человека отстало от искусства природы. Здесь мы еще остаемся подражателями и учениками. Химик может искусственно создавать важнейшие разновидности веществ, непосредственно участвующих в жизненном процессе — жиры и углеводы. Он приблизился к пониманию тайны белковых веществ, из которых состоят мозг, мускулы, кожные покровы — весь организм людей, животных и других живых существ, вплоть до микробов. Простейшие из белков уже воспроизведены в лаборатории.

Практическое значение открытий в этой области науки должно быть особенно ценным, казалось бы, для пищевой промышленности. Умение создавать основные пищевые вещества, исходя, если нужно, из элементов, могло бы, казалось, перевернуть все дело питания. Но природа поставляет нам белки, жиры и углеводы за несравненно более дешевую цену. Ведь живые организмы — сложнейшие фабрики, возникшие не в один или два года, а создавшиеся за миллионы лет развития жизни на Земле. Весьма отрадно уже и то, что при нужде мы умеем эти «фабрики» обслуживать и руководить ими.

Белки входят в состав нашего организма в виде массивных молекул с громадными молекулярными весами, примерно от 10 тыс. и до нескольких миллионов кислородных единиц. В нашем теле содержатся тысячи различных белков, каждый из которых имеет свое особенное строение, позволяющее ему осуществлять свою особую задачу в жизнедеятельности организма.

При кипячении со щелочами и кислотами громадные молекулы белков расщепляются на мелкие молекулы аминокислот — так плохо скованные цепи распадаются на отдельные звенья. Аминокислоты и являются теми звеньями, из которых слагаются молекулы всех белков. На рис. 2 представлена структура молекулы простейшей из аминокислот, так называемого глицина. В рамки заключена та группировка атомов, которая сохраняется во всех белковых аминокислотах. Остальные из числа всех 24 природных аминокислот, на которые расщепляются природные белки, отличаются от этой лишь тем, что один из водородных атомов замещен той или другой несложной группой атомов.

Это замещение имеет замечательное последствие: отмеченный звездочкой атом углерода становится асимметрическим. Но особенно поразительно другое. Каков бы ни был источник природной аминокислоты — любой растительный или животный вид, любой вид бактерий и даже любой вирус, — молекулы всех природных аминокислот оказываются, условно говоря, левыми; правых аминокислот в живой природе почти не встречается. Теперь вам понятно, почему в мире, отраженном в зеркале, мы должны были бы погибнуть голодной смертью (см. статью «Органические вещества вокруг нас»). Это произошло бы из-за отсутствия в пище белков, молекулы которых слагаются из левых аминокислот. Ведь при отра-

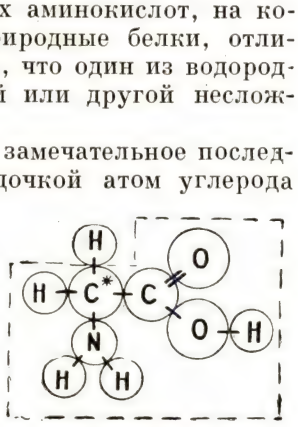


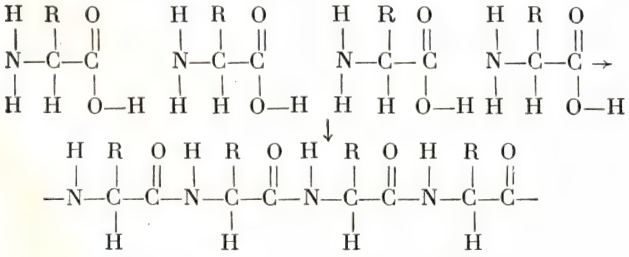
Рис. 2.

жении в зеркале молекулы природных белков из левых обратились бы в правые.

То, что происходит с белками в химической колбе, происходит и в природной «колбе» — в желудке: белки расщепляются в нем на аминокислоты. Маленькие молекулы аминокислот легко проникают через стенки желудка в кровяное русло и разносятся по тканям организма, где вновь сцепляются в молекулы белков. Значит, нам не обязательно питаться белками, можно питаться и непосредственно аминокислотами? Не обязательно даже, чтобы белковая пища попадала в желудок, можно впрыскивать раствор аминокислот прямо в кровь? Не только можно, но врачи так и поступают, когда пациент страдает настолько глубоким расстройством пищеварения, что его желудок отказывается переваривать белковую пищу.

Не обязательно, чтобы в аминокислотной диете содержались все 24 природные аминокислоты. Мы нуждаемся лишь в девяти из их числа, остальные 15 наш организм может изготовлять для себя сам. Низшие же организмы способны изготовлять для себя все необходимые аминокислоты из неорганических веществ.

Белковая пища полноценна, когда в ней содержатся все необходимые аминокислоты. Таков творог. Если в белковой пище недостает тех или иных необходимых человеку аминокислот, она неполноценна. Например, в желатине — белке, образующемся в результате вываривания костей,— недостает трех из числа необходимых человеку аминокислот. Сцепление молекул аминокислот в цепочкообразные молекулы белка осуществляется в тканях нашего организма путем отщепления воды:



В одних случаях молекулы образующегося белка уподобляются нити, свернутой в клубок (такие молекулы образуют, например, белок куриного яйца), в других случаях сохраняют вытянутую форму. Такая молекула напоминает длинную пружинку (рис. 4). Из молекул-пружинок, скрученных друг с другом, как проволочки в кабеле или тросе (рис. 3), слагаются наши волосы, ногти, мускулы и другие волокнистые ткани нашего организма. Эти молекулы действительно обладают отличительным свойством пружины: они могут растягиваться до длины, вдвое превышающей их нормальную длину, и сжиматься вновь, как только растягивающая сила перестает действовать.

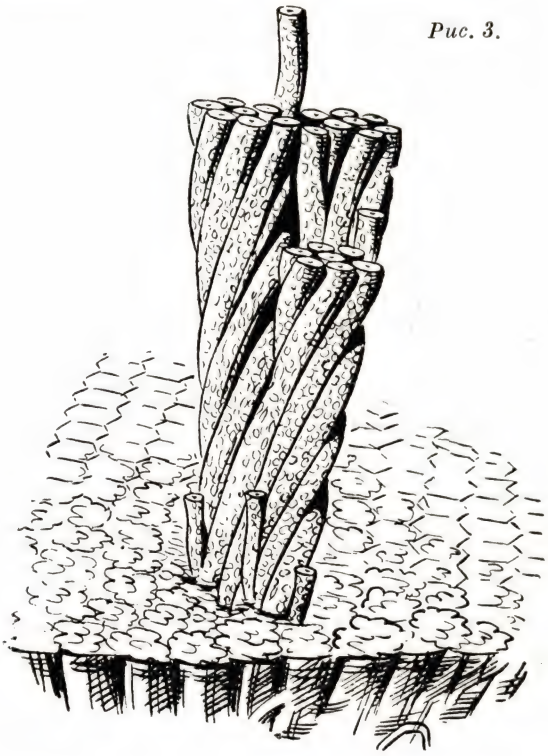


Рис. 3.

Удлинение пружинообразных молекул белков происходит не только при растягивании, но и при увлажнении. На этом основано действие волосяного гигрометра. Это обычный волос, натянутый грузиком и перекинутый через подвижное колесико. Когда воздух в комнате становится более влажным, волос удлиняется, поворачивает колесико и острие прикрепленного к колесику указателя перемещается по шкале.

Химик вводит расщепленный белок в прибор-автомат и спустя сутки без своего дальнейшего участия получает готовый результат анализа в виде графика, запечатленного на ленте. Но далее встает головоломно сложная задача: превратить данные анализа в структурную формулу. До конца удалось решить ее лишь для одного из животных белков-гормонов — инсулина. Молекула этого белка состоит из 51 звена, представленного 15 аминокислотами. Его структурная формула едва уместилась бы на странице этого тома. И

вот что замечательно: последовательность сцепления аминокислотных звеньев — строго одна и та же в инсулине, извлеченном из столь различных видов животных, как свинья и кит.

Штурм проблемы искусственного белка, начатый в свое время немецким ученым Фишером, продолжается в разных направлениях. Но и сейчас химия так же далека от решения задачи получения белков заводским путем, как и во времена работ Фишера.

Таким образом, современное положение вещей не позволяет особенно надеяться на коренное преобразование в ближайшем будущем современных способов питания.

Успехи в деле искусственного воспроизведения природных белков интересуют нас главным образом с совершенно другой стороны. Ведь эти успехи в какой-то мере приближают нас к решению величайшей теоретической и практической задачи — к искусственному созданию жизни.

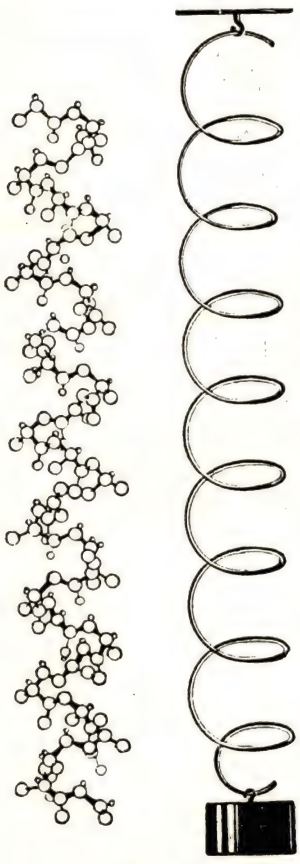


Рис. 4.

При искусственном воспроизведении белков не обошлось без разочарований. Многие рассчитывали, что создать белок — это и значит создать жизнь. Однако выделено большое количество белков, все они прекрасно сохраняются в химических пробирках, многие — в виде превосходных кристаллов, но признаков жизни в них так же мало, как в сахаре или крахмале. Однако в нас лишь укрепилась уверенность, что уяснение перехода от «неживого» к «живому» составляет цель, доступную именно химическому исследованию.

Химик обращается к биологу с вопросом: какими свойствами нужно наделить молекулу, чтобы она получила способность «жить»? Тогда уж его, химика, дело думать, какие сочетания атомов для образования этих свойств следует создать.

Многие не соглашаются с такой постановкой задачи. Они полагают, что жизнь имеет нехимическое начало, что она началась не с молекулы, а с какого-то уже достаточно сложного сочетания молекул, так как всякий живой организм обладает не только определенным химическим составом, но и определенной организацией. Подробное обсуждение этих мнений будет иметь смысл лишь тогда, когда мы точно определим, что именно разумеем мы под словом «жить».

Для того чтобы решить, что рассматриваемый объект — именно живое существо, мы должны установить у него одновременное наличие ряда свойств. Если же эти свойства удастся сочетать в одной молекуле, не сделается ли эта молекула живой? Создавая краски, химик именно так и сочетает в одной молекуле свойство быть окрашенной, свойство сцепляться с волокном и т. д.

Ставя таким образом задачу искусственного создания жизни, мы не рассчитываем, как алхимики, что из химической колбы выскочит готовый гомункулус — маленький живой человечек. Ведь живые существа, помимо всего прочего, имеют за собой миллионы лет истории, и мы вряд ли сможем перепрыгнуть через эту великую пропасть времени. Мы можем рассчитывать лишь создать нечто такое, что, будучи предоставлено самому себе, при благоприятных условиях превратилось бы спустя новые миллионы лет в растения, животные или нечто подобное тем и другим.

Будет ли это искусственно созданное «нечто» веществом или каким-то сверхпростым существом? В течение многих лет пристальное внимание ученых приковано к миру живых существ, недоступных даже сильнейшим микроскопам. Таков бактериофаг — «пожиратель бактерий». Действие бактериофага впервые описал русский ученый Н. Ф. Гамалея еще в 1898 г. Это такой же паразит по отношению к бактериям, как бактерия по отношению к человеку. Бактериофаги присутствуют всюду, где присутствуют бактерии: в животных организмах, в воде рек, озер, морей и т. д. Они выделены и из продуктов, не зараженных бактериями: из чеснока, лука, яблок, моркови. Бактериофаги удалось наблюдать лишь с помощью ультрамикроскопа и электронного микроскопа. Это инструменты такой мощной разрешающей силы, что им уже доступны наиболее крупные молекулы. Итак, бактериофаги имеют размеры массивных молекул! Это материя в состоянии раздробленности на молекулы. Но эта материя живет, т. е. питается и размножается, сохра-

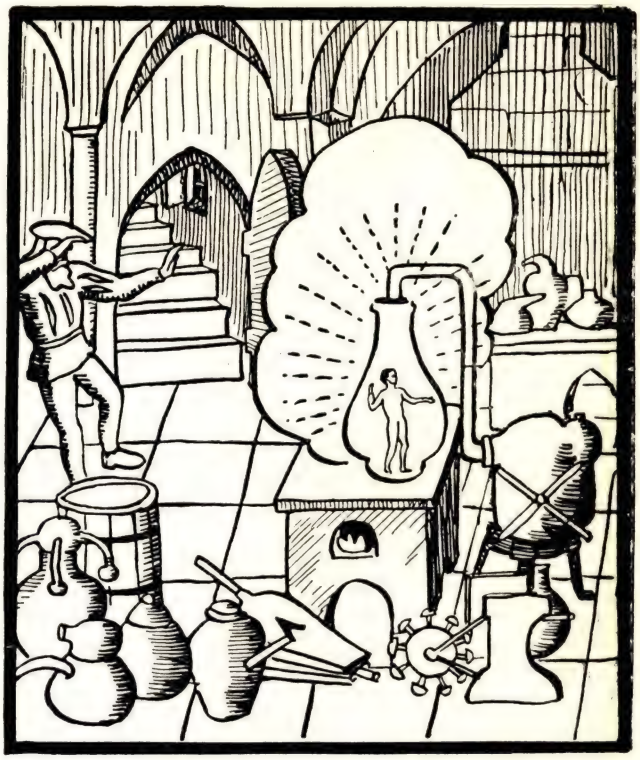
няя свои прирожденные свойства, и пятна его культуры постепенно захватывают всю поверхность питательной среды. Вокруг бактериофагов разгорелся страстный спор. По мнению одних, бактериофаг — это вещество, по мнению других — живое существо. Не есть ли он то и другое одновременно, т. е. разновидность искомой живой первоматерии?

Бактериофагам во всем, кроме условий существования, подобны вирусы —ультрамикроскопические возбудители заразных болезней, таких, как грипп, оспа, корь, краснуха, полиомиелит, бешенство. Первый вирус — возбудитель чумы у рогатого скота — был открыт тем же русским ученым Гамалея за два года до открытия им первого бактериофага. Частицы одних вирусов выглядят в электронном микроскопе, как шарики, других — как тонкие и длинные палочки. По отношению к людям, животным и растениям вирусы ведут себя совершенно как микробы. Живые организмы в свою очередь относятся к ним, как к микробам: в борьбе с ними они вырабатывают в себе «антитела», гибельные для данного вида вируса, и, перенеся болезнь, приобретают иммунитет, т. е. повторно этому заболеванию не подвергаются.

Но как у растений под влиянием особых условий возникают мутации — новые устойчивые разновидности, так и вирусы могут изменяться и превращаться в новые виды.

Естественно, что врачи обращаются с вирусами так же, как с микробами. А химики обращаются с теми же вирусами, как с самыми обыкновенными веществами: они растворяют их, адсорбируют, осаждают.

Итак, искусственные белки, сахар и шелк из дерева, тончайшие ароматические вещества из отвратительно пахнущих продуктов распада и разложения, бесчисленные краски и лекарства из каменноугольной грязи — все это не мечта и не сказка. Это явь XX в., результат неустанного изучения строения молекул. И когда мы теперь спрашиваем себя, что же такое химия, то химия представляется нам волшебным деревом с необычайно разнообразными плодами, но питающимися одними и теми же соками.



Так алхимики представляли себе искусственное создание жизни.

Направить эти соки в ту или другую ветвь — зависит от людей. От них зависит, будет ли химия врачевать или умерщвлять, улучшать пищевые продукты или фальсифицировать их, удобрять почву, красить материи, двигать суда, прокладывать туннели... Химия — это океан неисчерпанных и неисчерпаемых возможностей.

Перенесемся мысленно на атомную электростанцию, на площадку запуска космических ракет или в цеха автоматизированного завода. Все эти чудеса современной техники были бы немыслимы без химии, без материалов, которые создает она по заказу инженеров.

Химия в сложении с социализмом — это высокие урожаи, высокая производительность труда, культура и благосостояние трудящихся.

Справочный отдел

Что читать по химии

Мезенцев В. Загадка вещества (Из чего построен мир). М.—Л., Детгиз, 1951. 143 стр. с илл. (Школьная библиотека).

Книга рассказывает о развитии взглядов древних философов, алхимиков и ученых XVII—XVIII вв. на строение мира, живых и неживых тел природы, а также об открытии великих законов природы М. В. Ломоносовым и Д. И. Менделеевым, о разгадке строения атомов и атомного ядра зарубежными и советскими учеными.

Степанов В. История великого закона. Изд. 3-е. М., Учпедгиз, 1957. 192 стр. с илл.

Книга Степанова — очерки по истории химии. Автор показывает, как открытый Д. И. Менделеевым периодический закон и созданная им периодическая система элементов вывели химию из того тупика, в котором она оказалась, будучи бессильной объяснить «беспорядочную кучу» несистематизированных фактов, накопленных наукой в течение многих веков.

Шаскольская М. П. Кристаллы. М., Гостехиздат, 1956. 228 стр. с илл.

Рассказы о том, как возникают кристаллы в природе, как они выращиваются в лабораториях, образуются в производственных процессах из расплавов, паров, при электролизе, какими свойствами они обладают, каково их строение и как кристаллы служат человеку. Отмечаются заслуги в науке выдающегося кристаллографа Е. С. Федорова.

Дижур Б. Путешественники-невидимки. Рассказы об элементах. М., Детгиз, 1956. 96 стр. с илл.

Художественные рассказы об элементах-близнецах (металлах натрии и калии), об элементах-солеродах, удивительном сходстве в их свойствах, о нахождении их в природе в разнообразных химических соединениях, об открытии их учеными.

Розен Б. Семья солеродов. М., Детгиз, 1956. 160 стр. с илл. (Школьная библиотека).

Книга обстоятельно знакомит с открытием, получением, свойствами и многообразным применением в разных отраслях народного хозяйства галогенов — элементов VII группы, отмечает большие заслуги В. И. Вернадского, А. Е. Ферсмана, И. С. Курнакова в открытии природных ресурсов ценнейших ископаемых, содержащих эти элементы.

Андреева Е. и Андреев Ю. Огнем рожденное. Л., Детгиз, 1957. 208 стр. с илл.

Книга знакомит с интересной историей русского стекла и удивительно разнообразным применением его в науке, технике и быту. Рассказывается о выдающихся старинных русских мастерах и первых стеклодельных заводах на территории России, о работах М. В. Ломоносова по мозаике, о различных способах варки стекла, о разнообразном применении силанов.

Данько Е. Китайский секрет. М., «Советская Россия», 1957. 159 стр. с илл.

Увлекательная повесть об истории фарфора, о его мастерах, о трагической судьбе создателя русского фарфора Д. И. Виноградова и замечательных достижениях советских мастеров.

Тонин Ю. Как камень стал железным. Л., Детгиз, 1956. 160 стр. с илл. и цветными вкладками.

В своеобразной форме путешествия из глубины веков в наши дни автор знакомит с историей изобретения бетона, цемента, со способами закалки бетона, с переходом в строительной технике к таким высокопрочным материалам, как газобетон, железобетон.

Мар Е. О простом железе. М., Детгиз, 1955. 72 стр. с илл.

Это история путешествия куска железной руды с места ее добычи на обогатительную фабрику, в доменный, мартеновский и прокатный цехи большого металлургического завода с множеством механизмов и контрольных приборов.

Пешкин И. Как рождается сталь. М., Детгиз, 1955. 158 стр. с илл.

Книга Пешкина еще глубже и шире освещает вопросы, затронутые в книге Мара; перед читателем раскрывается длинная, на протяжении веков, история выплавки железа из руд, получение разнообразных по составу и свойствам железных сплавов (чугуна, стали), путь совершенствования металлургических процессов, связанный с прославленными именами ученых и мастеров-металлургов.

Ключников Н. и Колодцев Я. Алюминий. М., Учпедгиз, 1958. 86 стр. с илл. (Библиотека школьника).

Техника, быт современной жизни немыслимы без алюминия. Об этом металле, его нахождении в природе, получении, свойствах, многообразном применении и рассказывает книга. Авторы раскрывают исключительно важную роль сплавов и соединений алюминия в технике.

Фарадей М. История свечи. М., Детгиз, 1956. 112 стр. с илл. (Школьная библиотека).

Лекции Фарадея о процессах, связанных с горением свечи, читанные им для детей более ста лет назад и изложенные в этой книге, не теряют значения и в наши дни. Они учат наблюдать самые обыденные явления, научно мыслить, устанавливать единство и взаимосвязь в явлениях природы и находить их причины.

Ивич А. Обыкновенная лампа. М., Детгиз, 1957. 128 стр. с илл.

Книга заставляет юного читателя задуматься о многих вещах и явлениях, связанных с обыкновенной лампой, освещающей его стол. «Нужно,— говорит автор,— объехать страну, забраться под землю и под воду, чтобы узнать, как трудом тысяч людей и тысяч машин создавалась эта лампа». Это — рассказы о каменном угле, нефти, чугуне и стали, пластмассах, машинах, станках и электрическом токе.

Жемчужников Ю. и Гор Г. Каменный уголь. М., Детгиз, 1956. 80 стр. с илл.

Книга популярно рассказывает юным читателям о том громадном значении, какое приобрел каменный уголь в развитии нашей социалистической промышленности, о способах его добычи и переработке в жидкое топливо и ряд ценнейших продуктов, извлекаемых из каменноугольной смолы и отходов каменноугольного производства.

Тихонравов Н. Рассказы о нефти. М., Детгиз, 1954. 240 стр. с илл. (Школьная библиотека).

Книга рассказывает о чудесных приборах, с помощью которых производится разведка нефти, о новой технике бурения, о широко применяемых в нефтеперерабатывающей промышленности методах крекинга, пиролиза, каталитической ароматизации нефти, об использовании нефтепродуктов для производства синтетического каучука, пластмасс, красителей, этилового спирта, уксусной кислоты, жиров и других продуктов.

Розен Б. В мире больших молекул. М., Госкультпросветиздат, 1952. 206 стр. с илл.

Вначале автор рассказывает о строении вещества, основных законах химии и структурной теории Бутлерова, а затем о свойствах и применении искусственных и синтетических волокон, каучука, различных пластмасс, синтетических клеев, пенопластов, стеклопластиков и белков.

Реутов О. Органический синтез. Изд. 2-е. М., Гостехиздат, 1953. 64 стр. (Научно-популярная библиотека, вып. 22).

Книга показывает пути развития современного органического синтеза на основе структурной теории Бутлерова. Лаконично, но точно описывает сущность производственных процессов получения из угля, нефти и природных газов разнообразных синтетических веществ: каучука, пластмасс, волокон, красителей, лекарственных и душистых веществ, средств борьбы с вредителями растений, стимуляторов роста, и др.

Петров Г. и Петрова Л. Пластмассы. М., Детгиз, 1953. 80 стр. с илл.

Авторы знакомят юных читателей с получением в промышленности искусственных смол (методами варки, литья, горячего прессования, формовки), с применением давлений и катализаторов в автоматизированных процессах, с разнообразными областями применения всех видов пластических масс: в электро- и радиотехнике, в машиностроении и т. д.

Буянов А. Новые волокна. Изд. 2-е. М., Гостехиздат, 1953. 48 стр. с илл. (Научно-популярная библиотека, вып. 55).

Автор рассказывает о промышленных основах изготовления различных видов искусственного шелка, синтетического волокна из смол (капрон), стеклянного волокна, искусственной шерсти.

Крючков А. Синтетический каучук. М., Учпедгиз, 1954. 112 стр. с илл. (Библиотека школьника).

В книге коротко рассказано об истории натурального и синтетического каучука, описано получение мономеров из этилового спирта, из газов нефтепереработки, из угля и извести, из бензола (стирол), а также получение синтетического каучука разными методами полимеризации. Сопоставляются свойства различных каучуков, отмечаются их преимущества и недостатки.

Гродзенский Д. Атомная энергия — медицине. М., Гостехиздат, 1956. 72 стр. (Научно-популярная библиотека, вып. 90).

Во введении коротко говорится о получении изотопов элементов, о способах обнаружения радиоактивного распада. Довольно подробно говорится об исследовании обмена веществ в организме с помощью изотопов (меченых атомов) и об использовании ядерных излучений в распознавании и лечении болезней.

Морозов А. А. Михаил Васильевич Ломоносов. Изд. 2-е. М., «Молодая гвардия», 1955. 926 стр. (Жизнь замечательных людей).

Удостоенная Сталинской премии, книга Морозова представляет фундаментальный труд — научно обоснованную биографию М. В. Ломоносова. В образе Ломоносова автор раскрывает изумительный и вдохновляющий пример великого русского человека, ученого, философа-материалиста, преданнейшего патриота, отдавшего свой гений, свои силы служению родному народу, страстного борца за

передовую науку, против невежества и мракобесия, основоположника современной химической науки.

Писаржевский О. Дмитрий Иванович Менделеев. Изд. 2-е. М., «Молодая гвардия», 1951. 464 стр. с илл. (Жизнь замечательных людей).

В книге о Д. И. Менделееве, удостоенной Сталинской премии, автору удалось нарисовать живой, яркий образ великого ученого-новатора, корифея науки, горячего патриота. Гениальное открытие Менделеевым периодического закона стало открытием мирового значения, определило новый этап в развитии химической науки. Оценивая воспитательное значение этой книги, акад. Н. Д. Зелинский выразил пожелание, чтобы все читатели ее помнили «заветную мысль» Д. И. Менделеева, что труд есть радость и полнота жизни.

Гумилевский Л. Александр Михайлович Бутлеров. М., «Молодая гвардия», 1952. 336 стр. (Жизнь замечательных людей).

В книге приводятся подробные биографические данные о А. М. Бутлерове, о создании им теории химического строения, обозначившей новый этап в развитии органической химии и заложившей основы самостоятельной русской школы химиков-органиков. Значение структурной теории органических соединений иллюстрировано большим числом примеров из работ А. М. Бутлерова.

Парменов К. и Сморгонский Л. Книга для чтения по химии, ч. I. Изд. 2-е. М., Учпедгиз, 1955. 480 стр. с илл. и портр.

В первой части книги юные химики найдут интереснейший материал по истории химии, от самых древних ее истоков до открытия периодического закона элементов. Книга охватывает обширный материал по неорганической химии (исключая металлы).

Парменов К., Сморгонский Л. и Цветков Л. Книга для чтения по химии, ч. II. Изд. 2-е. М., Учпедгиз, 1956. 528 стр. с илл.

В содержание второй части книги входят «Растворы», «Металлы» и «Органические соединения». Ряд статей отражает успехи современной химической науки и промышленности, в частности в области получения синтетических материалов.

Храпковский А. Занимательные очерки по химии. Л., Детгиз, 1958. 104 стр. с илл.

Эта книга ответит на многие интересующие юных химиков вопросы: о происхождении названий химических элементов, о распространении их в природе, о различных свойствах простых и сложных химических веществ и об использовании их в нашем обиходе и в технологии различных производств. Разъясняются многие старинные и образные названия.

Азимов И. Химические агенты жизни (перевод с английского). М., ИЛ, 1958. 135 стр. с илл.

Увлекательные рассказы о «химическом хозяйстве» нашего организма — белках, ферментах, витаминах, гормонах.

Нейман М. Б. Радиоактивные изотопы и их применения. «Знание», 1959. 47 стр. с илл.

Лекция, рассматривающая применение радиоактивных изотопов в различных областях науки, техники, сельского хозяйства и медицины.

Новая химия (перевод с английского). Изд-во Академии наук СССР, 1959. 208 стр. с илл. (Научно-популярная серия).

Сборник переводных статей видных американских ученых, посвященных новым химическим реакциям (высокотемпературная химия, свободные радикалы и др.), новым методам химии (техника исследований миллионными долями грамма и др.), новым химическим элементам (синтетические элементы и их применение) и новым соединениям (кремнийорганические соединения, фтороуглероды, синтетические каучуки и др.). Увлекательно написанные очерки раскрывают последние достижения науки, их практические применения, перспективы дальнейших исследований и доносят до читателя романтику научного поиска и взволнованность исследователя, стоящего перед разгадкой новых тайн природы.

Розен Б. Чудесные добавки. Детгиз, 1957. 143 стр.

В занимательной форме автор рассказывает о микроудобрениях, истории их открытия и роли в сельском хозяйстве.

Шпаусус З. Путешествие в мир химии (перевод с немецкого). Учпедгиз, 1959. 454 стр. с илл.

Рассказы о важнейших химических элементах и их соединениях, о химических теориях и законах, о приложениях химии в быту и промышленности и о творцах химии.

Зорина Л. Юный химик. Описание 100 опытов по занимательной химии в быту. Изд. 2-е. МХП, 1958. 48 стр. с илл.

К этому руководству продается выпущенный Госхимзаводом им. Войкова набор необходимых для этого реактивов, химической посуды и других принадлежностей. Юный химик может своими руками проделать ряд интереснейших опытов по выращиванию кристаллов, по определению состава пищевых продуктов, испытанию свойств многих других веществ.

Указатель имен и предметов

А

Авитаминóз — заболевание, вызываемое недостатком в организме тех или иных витаминов. Острая форма авитаминоза может привести к смерти—695

Адреналúн — вещество из класса гормонов (см.), вырабатывается надпочечниками — 691, 692

Адсорбция — явление поглощения растворенного или газообразного вещества поверхностью твердого тела или жидкости (адсорбента) —579, 638

Акрилонитрúл — производное акриловой кислоты $CH_2=CHCOOH$, прекрасно полимеризуется. Реакцию полимеризации его с бутадиеном используют для получения некоторых сортов синтетического каучука, стойких к набуханию в распространенных растворителях, к нагреванию и старению—670, 671

Активаторы — см. Промóторы.

Ализарúн — один из наиболее древних красителей, известных человечеству. Долгое время получался из корня красильного растения марены. В 1869 г. ализарин получен синтетически из каменноугольной смолы —686

Алхимия — средневековое название науки, целью которой в тот период было главным образом превращение неблагородных металлов (меди, свинца) в благородные (золото, серебро) с помощью «философского камня» —571

Амилаза — фермент, способствующий расщеплению крахмала; содержится в слюне и соке поджелудочной железы — 639, 640

Аминокислоты — вещества, из которых слагаются молекулы белков. Название аминокислот происходит от наличия в их молекулах аминогруппы NH_2 и карбоксильной группы COOH, благодаря чему аминокислоты проявляют одновременно и основные, и кислотные свойства —679, 696

Анетóл — синтетическое душистое вещество с запахом анисового масла; получается из бензола, употребляется в медицине и парфюмерии —690

Анилúн — $C_6H_5NH_2$ — важнейшее производное бензола. Анилин является исходным продуктом для производства разнообразных синтетических красителей —687, 689

Антибиóтики — химические вещества, образуемые микроорганизмами и обладающие способностью подавлять рост и даже убивать другие микроорганизмы и бактерии. К числу антибиотиков относятся пенициллин, стрептомицин, грамицидин —568

Антисéптики — химические вещества, убивающие болезнетворных микробов, применяются в медицине для дезинфекции, при лечении ран в целях уничтожения возбудителей болезней, для консервации пищевых продуктов, древесины и т. д.—692

Асимметрический атом углерода — атом углерода в составе молекулы, связанный с четырьмя различными атомами или различными атомными группами. Наличие асимметрического атома углерода обусловливает появление оптической активности растворов веществ —656, 657, 696

Аспирúн — жаропонижающее и болеутоляющее средство, производное салициловой кислоты —694

Атомно-молекулярная теория — учение о прерывистом, зернистом строении материи. Уже некоторые философы древности высказывали взгляды об атомистическом строении материи, но они утверждали неизменность, неделимость атомов—578, 579

Б

Бакелúт — один из видов пластмассы, полученный конденсацией фенола с формальдегидом. Бакелит выдерживает довольно высокую температуру, устойчив к действию химических реактивов, прекрасный электроизолятор —662, 668

Бактериофа́г — «пожиратель бактерий». Бактериофаги имеют размеры молекул и видимы только с помощью ультра- или электронного микроскопа. Бактериофаг играет исключительно важную роль в борьбе с болезнетворными, особенно кишечными, бактериями. В настоящее время бактериофаг выделен из растительных объектов (морковь, лук, чеснок, яблоки) —698, 699

Барбиту́ровая кислота — синтетическое органическое вещество, производные которого применяются как снотворные средства (см. Веронал и Люминал)—694

Белки — высокомолекулярные органические вещества, очень сложные молекулы которых построены из аминокислот. Белки являются основной составной частью живого организма и стоят в центре обмена веществ—568, 639, 660, 673, 676, 679, 680, 697, 698

Беспламенное горение — метод интенсивного сжигания горючих газов. За счет сокращения длины пламени процесс горения сосредоточен на малом участке —634, 636, 641

Бронза — сплав меди с различными металлами (оловом, свинцом, алюминием, марганцем и др.), один из первых сплавов, полученных человеком—626

Ванили́н — органическое душистое вещество, содержащееся в плодах растения ванили, применяется в кондитерском деле и парфюмерии —690

Верона́л — снотворное средство, производное барбитуровой кислоты (см.), вызывает сон средней продолжительности. В больших дозах может вызвать отравление —695

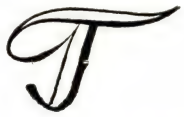
Вирусы — ультрамикроскопические возбудители инфекционных заболеваний (от лат. «вирус» — яд). Большинство вирусов проходит через фильтры и поэтому называются фильтрующимися—696, 699

Вискоза — вязкий щелочной раствор клетчатки; продавливая его через специальные отверстия в раствор кислоты, получают нити вискозного шелка (см. Искусственный шелк). Вискоза используется также для получения различных пленок —675

Витамины — вещества, жизненно необходимые организму, где они содержатся в ничтожно малых количествах и выполняют роль своеобразных катализаторов —658, 676, 693

Вулканизация — процесс превращения каучука в резину путем совместного нагревания его с серой. Внедрение атомов серы в молекулы каучука делает его более прочным и твердым, более устойчивым к колебаниям температуры и действию различных агрессивных сред —661

Высокопрочный чугун — чугун вторичной плавки с повышенными показателями прочности —630



Гексахлора́н (гексахлорциклогексан) — важнейший синтетический сельскохозяйственный ядохимикат. Применяется в виде дуста — порошка, состоящего из гексахлорана в смеси с наполнителем (мел, тальк и др.) —657

Гемоглоби́н — красящее вещество крови, выполняющее в организме роль переносчика кислорода—687

Гербици́ды — вещества, применяемые для борьбы с сорными растениями —565

Германи́н — лекарственное вещество эмпирической формулы $C_{51}H_{40}O_{17}S_4N_6$, применяется при лечении сонной болезни —654, 655

Гидрогенизация — реакция присоединения водорода к различным соединениям, протекающая под влиянием катализаторов (см.) — 679

Гидролиз — вид химической реакции между водой и растворенным в ней веществом —677

Глюкоза (виноградный сахар) — $C_6H_{12}O_6$ — один из простейших представителей класса углеводов, один из конечных продуктов сложных превращений, претерпеваемых в организме более сложными углеводами —639, 661, 677

Гормо́ны — особые вещества, вырабатываемые в организме железами внутренней секреции — 568, 695

Декстри́ны — промежуточные продукты гидролиза крахмала на пути его превращения в глюкозу — 635, 639, 640, 677

Денатурация — необратимое свертывание белка, происходящее при изменении температуры, давления, реакции среды и т. д.—640

Детонация — распространение возникшего превращения (взрыва) на всю массу вещества или смеси. Детонация взрывчатых веществ возникает при воздействии пламени, удара, трения или ударной волны —684

Изомерия — явление одинакового качественного и количественного состава молекул различных веществ при различном пространственном расположении атомов внутри этих молекул —580, 653

Изомеры — вещества одинакового качественного и количественного состава, но различающиеся по своим физическим и химическим свойствам в силу различного пространственного положения атомов внутри их молекул—657

Изопрен — летучий углеводород состава

$$CH_2 = CH - CHCH_3 = CH_2,$$

на основе которого впервые был получен в лаборатории искусственный каучук. В настоящее время изопрен используется для получения искусственного каучука в промышленном масштабе —657, 661

Изотактические полимеры — полимеры, боковые ветви которых расположены все по одну сторону от основной углеродной цепочки —663

Ингибитор (коррозии) — вещество, незначительная добавка которого в коррозионно-активную среду замедляет разрушение металлов —634, 645

Индиго — один из наиболее древних красителей, известных человеку. Добывается из тропического кустарника индигоноски. Индиго — прекрасный кубовый краситель ярко-синего цвета. В настоящее время индиго получается синтетически из анилина (см. Анилин) —686, 687, 689

Индикаторы—вещества, меняющие свою окраску в зависимости от реакции среды (кислая, щелочная)—618

Инициаторы — вещества, возбуждающие, ускоряющие реакцию. От катализаторов (см.) инициаторы отличаются тем, что, принимая участие в реакции, они сами при этом расходуются —645, 664, 666

Инсектициды — ядохимикаты, применяемые для борьбы с насекомыми —565

Искусственный шелк — шелк, полученный путем обработки различными химическими реагентами природной клетчатки (хлопок, древесина). В зависимости от применяемого реагента различают нитрошелк, медноаммиачный, вискозный и ацетатный шелк — 674, 675

Казеин — белок, содержащийся в молоке. Казеин можно выделить из молока при действии на него кислотами. Казеин содержится в твороге и сырах, обладает высокой питательной ценностью—661, 681

Калорийность — количество тепла, выделяющееся в результате сгорания данного вещества. Калорийность различных видов пищевых продуктов определяется соотношением белков, жиров и углеводов, входящих в их состав. При окислении в организме выделяется следующее количество тепловой энергии (в *ккал/г*): 1 *г* белка — 4,1; 1 *г* жира — 9,3; 1 *г* углеводов — 4,1 —681

Каменный уголь — горная порода растительного происхождения, состоит из отмерших деревьев и кустарников, претерпевших глубокое разложение без доступа воздуха под давлением вышележащих слоев и при повышенной температуре —640, 649, 682

Камфара — сложное органическое вещество, добываемое из камфарного дерева и шалфея. Замечательные лекарственные свойства этого вещества известны с глубокой древности. Камфара возбуждает нервную систему, улучшает работу сердца, регулирует кровяное давление. В настоящее время камфара получается и синтетически —567, 634, 635

Капрон — см. Синтетические волокна.

Карболовая кислота — см. Фенол.

Катализ — процесс изменения скорости химической реакции (ускорение, замедление) под действием особых веществ — катализаторов (см.) —567, 634, 635

Катализаторы — вещества, изменяющие скорость реакции (ускоряют или замедляют ее). Сами катализаторы при этом не расходуются и по окончании реакции могут быть выделены в том же количестве — 634, 638, 641, 658, 667

Катализаторы биологические — см. Ферменты, Гормоны, Витамины.

Каталитические яды — вещества, отравляющие катализатор (см. Отравление катализатора)—638

Каучук натуральный — вещество растительного происхождения, добываемое из каучуконосных растений: гевеи (Бразилия), гваюлы (Мексика), коксагыза, тау-сагыза (СССР) —657, 669

Каучук синтетический (СК) — вещества, получаемые синтетическим путем, близкие по составу и свойствам к натуральному каучуку (см.). Ни один из синтетических каучуков не идентичен натуральному, но многие каучуки по отдельным качествам превосходят натуральный. В основе получения синтетического каучука лежит реакция полимеризации (см.)—657, 662

Клетчатка (целлюлоза) — $(C_6H_{10}O_5)_n$ — полисахарид, конечным продуктом гидролиза клетчатки является глюкоза (см.). Клетчатка составляет основу многих растений, формируя стенки их клеток—661, 670, 673, 676, 682

Ковкий чугун — особый вид чугуна, получаемый путем специальной термической обработки белого чугуна (см.). Ковкий чугун отличается мягкостью и вязкостью, находит применение в различных отраслях машиностроения, станкостроения, строительства и т. д.—630

Коксование — промышленный метод переработки различных видов каменных углей путем нагревания их без доступа воздуха. В результате коксования получаются: кокс, коксовый газ и каменно-угольная смола —658

Коррозия — вредное поверхностное разрушение твердых тел (главным образом металлов) под влиянием различных физико-химических воздействий — 629, 632

Красители — органические соединения (природные и синтетические), обладающие свойством при взаимодействии с различными материалами закрепляться на них, передавая им свою окраску —687

Крахмал — смесь полисахаридов общей формулы $(C_6H_{10}O_5)_n$. При полном гидролизе крахмала образуется глюкоза (см.). Крахмал содержится во многих растениях и является первым продуктом фотосинтеза —635, 639, 676

Кре́кинг — процесс расщепления больших, тяжелых молекул высококипящих нефтепродуктов на легкие и подвижные «осколки», имеющие низкую температуру кипения. Основная цель крекинга — получение легкого моторного топлива — бензина. Газообразные продукты крекинга используются в химической промышленности—567, 683, 684

Кремнийорганические смолы, смазки и эмульсии — высокомолекулярные химические соединения, получаемые путем гидролиза, конденсации (см.) и полимеризации (см.) кремнийорганических мономеров (см.)—670

Кремнийорганические соединения — химические соединения, в состав молекул которых входят углерод и кремний. Различают низкомолекулярные (силаны) и высокомолекулярные (см. Кремнийорганические смолы и т. д.). Кремнийорганические соединения, содержащие кислород, так же как и углеводороды, склонны к полимеризации—671

Кумарин — органическое вещество, содержащееся во многих растениях, имеет запах свежескошенного сена. В настоящее время кумарин получается синтетически и широко применяется как душистое вещество в парфюмерии, пищевой промышленности, при ароматизации табаков —690

Лаки — жидкости различного химического состава, наносимые тонким слоем на предметы и образующие при высыхании твердые пленки —661

Латунь — сплав меди с цинком. Латунь более устойчива против атмосферных воздействий, чем, например, железо—625

Легированные стали — специальные сорта стали, в которые, кроме неизбежных составных элементов, входят особые легирующие материалы. Легирование позволяет получать стали с требуемыми свойствами—628, 631

Липаза — фермент, содержащийся в соке поджелудочной железы и разлагающий сложные молекулы жиров на глицерин и жирные кислоты, которые легко усваиваются организмом —639, 679

Люминал — снотворное средство, производное барбитуровой кислоты (см.), вызывает глубокий продолжительный сон. В больших дозах люминал вызывает отравление и даже смерть —695

Магниевые сплавы — сплавы, основным элементом которых является магний. Наибольшее применение имеют сплавы магния с алюминием, цинком и марганцем. Магниевые сплавы отличаются легкостью и высокими механическими свойствами, находят применение в авиационной, автомобильной промышленности, электропромышленности и т. д.—632

Маргарин — пищевой жир, приготовляемый из смеси растительных и животных жиров, молока и других составных частей (красители, ароматизаторы)—679

Масла́ смазочные — органические продукты различного состава и происхождения. Получают их главным образом при переработке нефти и широко используют для смазки трущихся частей машин, шарикоподшипников, для предохранения от коррозии различных металлических изделий и т. д. — 660

Мельхиор — сплав меди с никелем, серебристо-белого цвета, устойчив против коррозии—625

Ментол — органическое душистое вещество с запахом мяты, содержится в масле мяты; синтетически ментол получается из бензола и его производных, находит применение в медицине и парфюмерии — 690

Микроэлементы — элементы, жизненно необходимые или полезные для растительных и животных организмов, но требующиеся в минимальных количествах. К числу микроэлементов относятся: медь, марганец, бор, цинк, молибден, кобальт и др.—617

Модификаторы — специальные добавки, изменяющие структуру сплавов, а следовательно, и их свойства. В качестве модификаторов употребляются: магний, титан, ванадий, хром и пр., применяются при выплавке различных сортов чугуна и стали—630, 663, 666

Мономеры — простые молекулы, «кирпичики», из которых складываются молекулы полимеров (см.) — 660

Мочевина — $CO(NH_2)_2$ — вещество, содержащееся в моче животных и человека. Это органическое вещество в 1828 г. впервые синтезировано из неорганических веществ немецким химиком Вёлером, что подтвердило отсутствие резкой границы между органическими и неорганическими веществами — 649, 681

Мускон — вещество, которому обязан своим запахом природный мускус, содержится в нем в количестве до 1%, входит в состав многих дорогих духов —691

Мускус — природное душистое вещество, получаемое из железы самца кабарги — дикого животного из породы коз. Мускус содержится также в корнях некоторых растений —691

Нейлон — см. Синтетические волокна.

Нержавеющая сталь — специальная сталь, устойчивая против атмосферной и водной коррозии (см.). Нержавеющая сталь находит широкое применение в авиа-, авто- и станкостроении —625

Нефть — сложная смесь углеводородов различного состава с примесью сернистых и азотистых соединений. Нефть является ископаемым горючим веществом и используется как топливо. При переработке нефти получают целый ряд ценных химических продуктов: красители, смолы, лекарственные вещества, строительные материалы и т. д. —565, 636, 641, 658, 682

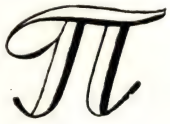
Никотин — инсектицид растительного происхождения, содержится в листьях и семенах табака, относится к классу алкалоидов, проявляет токсическое действие, попадая на наружные покровы насекомого, применяется для борьбы с вредителями сельского хозяйства. Никотин сильно действует на организм, вызывая в малых дозах возбуждение, а в больших — паралич и даже смерть —656

Нихром — сплав никеля и хрома с небольшой примесью других элементов. Нихром отличается высокой жаростойкостью (до 1200°) и электрическим сопротивлением, поэтому находит применение в производстве нагревательных приборов —628

Октановое число — единица измерения антидетонационных (см. Детонация) свойств моторного топлива. Одним из наиболее детонационно стойким углеводородов является изооктан, его стойкость принята за 100. За 0 принята детонационная стойкость Н-гептана—684

Оптическая изомерия — вид пространственной изомерии, наблюдающейся у некоторых органических веществ и сложных неорганических соединений. Оптическая изомерия проявляется в оптической активности соединения, т. е. в способности отклонять плоскость поляризации светового луча вправо или влево. Оптически изомерными являются вещества, содержащие асимметрический атом углерода —580

Отравление катализатора — снижение или полное уничтожение каталитической активности в результате воздействия некоторых веществ — каталитических ядов —638



Парафин — смесь различных углеводородов с очень длинными углеродными цепями (до 100 атомов углерода), выделяемая из природной нефти. Парафин — белое полупрозрачное вещество, мягкое и легкоплавкое — находит применение в медицине (парафиновые ванны, мази), парфюмерии и т. п.— 658, 659

ПАСК — противотуберкулезный препарат, производное салициловой кислоты (см.)—694

Пепсин — фермент, способствующий расщеплению сложных молекул белков на более простые молекулы аминокислот (см.), которые усваиваются организмом. Пепсин содержится в желудочном соке — 639, 679, 682

Перлон — см. Синтетические волокна.

Плазмохин — синтетический противомалярийный препарат —693

Плазмоцид — синтетический противомалярийный препарат, в больших дозах вызывает отравление —693

Пластеины — белковоподобные вещества, синтезированные при помощи ферментов из продуктов гидролиза белка. Пластеины имеют сложный состав и молекулярный вес до 6000 —682

Пластмассы — синтетические вещества, очень сложного состава, получаемые на основе природных и синтетических смол, белковых веществ, эфиров, целлюлозы и т. д.—632, 636, 658, 661

Плексиглас (полиметилметакрилат) — бесцветная прозрачная пластмасса, органическое стекло, применяется в технике и строительстве для различных целей —666

Платинит — сплав железа с никелем, имеет коэффициент объемного расширения, одинаковый с платиной (отсюда название) и стеклом. Применяется в качестве проводников, впаиваемых в стекло при изготовлении различных приборов —625, 628

Победит — сплав карбида вольфрама с никелем, получаемый спеканием их порошков под давлением, отличается большой твердостью и находит применение главным образом при изготовлении горнорудных инструментов и в станкостроении — 632

Полиамиды (полиамидные смолы) — синтетические смолы, получаемые реакцией поликонденсации аминокислот, карбоновых кислот и других продуктов. Полиамиды характеризуются волокнистым строением и широко используются в производстве синтетических волокон —665

Полиамидные волокна — синтетические волокна (см.), получаемые из полиамидных смол. Отличаются прочностью, устойчивостью к воде, процессам гниения —669

Поливинилхлорид — синтетическая смола, получаемая полимеризацией хлористого винила, используется в производстве пластмасс, идущих для изготовления труб, изоляторов, деталей химической аппаратуры и т. д.—666

Поликарбонаты — синтетические смолы, полученные взаимодействием угольной кислоты с фенолами, характеризуются высокой теплостойкостью —665

Поликонденсация — процесс соединения относительно простых исходных веществ (одинаковых и различных) в сложные молекулы полимеров. Поликонденсация сопровождается выделением простых молекул (воды, аммиака и т. д.) —664

Полимеризация — процесс соединения простых молекул «мономеров» (см.) в большие, сложные «полимеры». Этот процесс протекает при наличии в простых молекулах непрочных двойных связей, которые, размыкаясь, соединяются друг с другом в длинные цепочки полимеров. Процесс полимеризации не сопровождается выделением каких-либо побочных продуктов реакции —567, 657, 661, 664

Полимеры (высокомолекулярные вещества) — вещества, состоящие из большого числа сравнительно простых звеньев. Синтетическим путем получены полимеры с заранее заданными свойствами, каких не встречается в живой природе —659, 663, 667, 669

Полистирол — синтетическая смола, обладающая термопластическими свойствами, хорошо формуется, обладает механической прочностью, электроизоляционными свойствами, химически устойчива —665, 666, 670

Полиэтилен (политэн) — $(-CH_2-CH_2)_x$ — высокомолекулярное синтетическое вещество, полученное полимеризацией этилена ($CH_2=CH_2$). Чрезвычайно разнообразное и широкое применение полиэтилена (электроизоляция, химически стойкие покрытия, синтетические волокна, пластмассы, пленки и др.) завоевало ему бесспорное право называться «королем пластмасс» —658, 662, 666

Полиэфиры — синтетические смолы, полученные полимеризацией двухосновных кислот с гликолями, используются в производстве синтетических волокон большой прочности —665

Припой — сплавы различного состава, применяющиеся при пайке для заполнения зазоров между деталями —625, 627

Присадки — вещества, добавляемые в небольших количествах к смазкам и моторным топливам с целью улучшения их свойств. В металлургии присадки вводятся в плавильную печь для придания нужных свойств выплавляемому металлу или шлаку —629

Промо́торы — усилители, вещества, добавление которых в небольших количествах повышает активность катализатора (см.). Сами промоторы активностью не обладают и проявляют эти качества только в смеси с катализаторами. В качестве промоторов применяются различные окислы, гидраты окислов, кислоты, соли—636

Птиалин — фермент, содержащийся в слюне, способствует первоначальному раздроблению больших молекул крахмала на более мелкие составные части —677

Пу́рпур — очень стойкий органический краситель алокрасного цвета, добывавшийся из моллюска «мурекса», обитающего в южных морях.

В настоящее время синтезирован искусственный пурпур, по красоте и прочности даже превосходящий природный —686, 689

Ростовые вещества — природные и синтетические вещества, ускоряющие или замедляющие рост растений и способствующие созреванию плодов—565

Салициловая кислота — лекарственное вещество, получаемое из многих растений, прекрасное средство против ревматизма. В настоящее время салициловая кислота получается синтетическим путем из фенола. Многие производные салициловой кислоты также являются ценными лекарственными веществами —694

Салол — кишечнодезинфицирующее вещество, производное салициловой кислоты —694

Сахароза (свекловичный или тростниковый сахар) — $C_{12}H_{22}O_{11}$ — один из представителей класса углеводов —678

Свободные радикалы — химические частицы, получающиеся в результате отщепления от молекул отдельных атомов или групп атомов. Имеют одиночные электроны и отличаются высокой реакционной способностью —567, 644, 666

Селективность — избирательность, предпочтительное выделение из всей совокупности возможных направлений течения реакции одного, определенного направления —636

Серый чугун — вид чугуна, характерной особенностью которого является наличие в структуре зерен графита, придающих чугуну характерный серый цвет; применяется для отливки деталей машин —629, 630

Силон — см. Синтетические волокна.

Силиконовые краски, лаки, резина (силиконы) — кремнийорганические вещества, в нитевидных молекулах которых чередуются кремний и кислород. Все силиконы отличаются высокой теплостойкостью и используются в производстве изделий, подвергающихся воздействию высоких температур — 671

Синтетические волокна (капрон, перлон, силон, нейлон, нитрон, лавсан и др.) получают из различных синтетических смол, сырьем для которых в свою очередь служат каменный уголь, нефть, вода и т. д. Синтетические волокна отличаются большой прочностью (капрон — 75 *кг/мм*^{2} при толщине нити до 0,01 *мм*), химической стойкостью, устойчивостью к воде и воздействию микроорганизмов —665

Синти́н — смесь различных углеводородов, получаемых синтезом из окиси углерода и водорода. Окисление синтина при высокой температуре в присутствии катализаторов приводит к образованию жирных кислот. Синтин используется в качестве жидкого топлива —682

Сталь — сплав железа с углеродом переменного состава —626, 629, 631

Сульфаниламидные препараты — лекарственные вещества, получаемые из сульфаниловой кислоты — 693

Условные обозначения и сокращения

Книжка № 306 2/XII

ОМФ — основы марксистской физ.

ДМ

СОКРАЩЕНИЯ ФИЗИЧЕСКИХ ТЕРМИНОВ

Å — ангстрем
а — ампер
а·ч — ампер-час
в — вольт
вт — ватт
Г — грамм-сила
г — грамм-масса
Г/см³ — грамм кубический сантиметр (удельный вес)
г/см³ — грамм на кубический сантиметр (плотность)
гц — герц
дж — джоуль
дин — дина
кал — калория
квт — киловатт
квт·ч — киловатт-час
кГ — килограмм-сила
кг — килограмм-масса
кГ/м³ — килограмм на кубический метр (удельный вес)
кг/м³ — килограмм на кубический метр (плотность)
кГм/сек — килограммометр в секунду
кгц — килогерц
ккал — килокалория
л — литр
л. с. — лошадиная сила
м — метр
м³ — кубический метр
Мгц — мегагерц (1 000 000 *гц*)
мк — микрон (0,000 001 *м*)
мм — миллиметр
ммк — миллимикрон (0,000 000 001 *м*)
мксек — микросекунда (0,000 001 *сек*)
мм рт. ст. — миллиметр ртутного столба
мсек — миллисекунда (0,001 *сек*)
м/сек — метр в секунду
м/сек² — метр в секунду в квадрате
Мэв — мегаэлектроновольт
мол. в. — молекулярный вес
об/мин — оборот в минуту
ом — ом
см — сантиметр
см³ — кубический сантиметр
см/сек — сантиметр в секунду
см/сек² — сантиметр в секунду в квадрате
темп. абс. — температура абсолютная
темп. крит. ($T_{кр}$, $t_{кр}$) — температура критическая
эв — электроновольт
э. д. с. — электродвижущая сила

~~ОМФ 300 (19.IV.69)~~

1	~~350 — 15.III.70~~	Материализм и эмпирио-... ~~90 — 20.07.72~~			~~+50~~
2	~~450 — 22.III.70~~		~~300 — 20 = 280 (3.IX.69)~~		Всего
3.	~~300 — 29.XI.71.~~				
	~~250 — 23.03.72 100 R~~		~~110. 23.03.72. 70 100 R~~	~~25.03.72~~	~~360~~
20	~~100 — 20.07.72~~		~~90. 20.VII.72 99 — 20.07.72~~	~~20.VI.72~~	~~340~~
	300 — 6.01.73, (3,10×10) 23.1.74 + 60 (5.12)		(3·10 + 20) (8.08.73) 24.1X + 80 26.XI		~~350 + 130 = 4~~ ~~210 + 130 = 34~~ ~~140~~
	~~250 — 150 = 210~~ ~~210 — 70 = 140~~ ~~130.~~ 27.04. ~~215 + 30~~ 10.25 = ~~250~~ ~~150 + 170 + 200~~ (10.12) ~~+ 70~~		~~200 — 150.~~ (27.04) 350 + 50 ~~160~~ ~~+ 30 + 160 = 250~~		~~370~~ 410 ~~870 + 50~~

Художественное оформление С. М. Пожарского

Рисованые заставки К. К. Соколова

Рисунки к содержанию Н. И. Гришина

Главный художник А. И. Гангалюк

Иллюстрации и схемы выполнили художники:

Авотин Р. Ж., Алимов Б. А., Арцеулов К. К., Барышникова С. Н., Бедарев Г. К., Бирюков А. П., Борисов Е. С., Вендров Л. С., Вечканов Н. К., Волков С. Н., Гришин Н. И., Добровольский В. Н., Долматов В. А., Зальцман Ю. И., Каплан С. И., Короткова Е. А., Киселевич М. Д., Лебедев А. Н., Малышев Б. А., Наумов С. Г., Невельсон Е. Г., Петров А. В., Русаков С. К., Самыгин В. Д., Соколов К. К.

* * *

Старший редактор тома
Г. В. Левенштейн

Художественный редактор
Е. Б. Шапалина

Редакторы
А. А. Красновский и ***В. С. Шкляр***

Художественно-технический редактор
Н. П. Самохвалова

Сдано в набор 28/XII 1958 г. Подписано в печать 21/III-1961 г. Формат 84×108 1/16 — 89 печ. л. + 23 вклейки — 79,14 усл. п. л. (87,81 уч.-изд. л.). Тираж 100 000 (400 001 — 500 000) экз. Т04204. Издательство Академии педагогических наук РСФСР, редакция Детской энциклопедии. Адрес редакции: Москва, Чистые пруды, 6.

Цена 2 руб. 80 к.

Текст отпечатан с матриц Первой Образцовой типографии имени А. А. Жданова. Цветные вклейки отпечатаны в Первой Образцовой типографии.

Московская типография № 2 Московского городского совнархоза.
Москва, проспект Мира, 105.
Заказ 964